

TEILCHEN- PHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10

Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

LADUNGEN,
WECHSEL-
WIRKUNGEN
UND TEILCHEN

JOACHIM
HERZ

STIFTUNG



Impressum

Herausgeber: Joachim Herz Stiftung,
Langenhorner Chaussee 384, 22419 Hamburg
Autor: M. Kobel, U. Bilow, P. Lindenau, B. Schorn
Layout und Gestaltung: Annett Schuft, Nicole Keller, Kristina Düllmann
Druck und Verarbeitung: addprint AG, Bannewitz
3. Auflage 2018
Der Inhalt ist urheberrechtlich geschützt.

Das vorliegende Heft wurde im Rahmen des Kooperationsprojektes
„Unterrichtsmaterial Teilchenphysik“ der Joachim Herz Stiftung und von
Netzwerk Teilchenwelt erstellt. Das Material wurde federführend vom
Netzwerk Teilchenwelt unter Leitung von Prof. Dr. Michael Kobel erarbeitet.



LIEBE LEHRKRÄFTE,

spätestens seit Juli 2012, als der Nachweis des Higgs-Teilchens am CERN verkündet wurde, bekam die Teilchenphysik so viel öffentliche Aufmerksamkeit wie nie zuvor.

Dieses Interesse macht selbstverständlich auch vor der Schule nicht halt, die meisten von Ihnen kennen entsprechende Schülerfragen, viele von Ihnen haben versucht, Aspekte der Teilchenphysik in den Unterricht zu integrieren. Oft fehlte es bisher an passenden Materialien. Über zwei Jahre haben das Netzwerk Teilchenwelt und die Joachim Herz Stiftung in einer Reihe von Workshops mit Lehrkräften und Wissenschaftlern* daran gearbeitet, Unterrichtsmaterial zu entwickeln, das Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen zur Vermittlung der Teilchen- und der Astroteilchenphysik geben soll: fachlich korrekt und gleichzeitig praktisch einsetzbar.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Michael Kobel, dem Hauptautor dieses Bandes. Ohne sein unermüdliches Engagement würde es diese Reihe mit Unterrichtsmaterialien nicht geben. Mein Dank gilt weiter seinem Team vom Netzwerk Teilchenwelt, für diesen Band insbesondere Uta Bilow, Philipp Lindenau und Bernadette Schorn. Dank gebührt ferner den vielen Lehrkräften, die in den Workshops und an den Materialien mitgearbeitet haben. Gemeinsam mit Thomas Unkelbach wurde dieses Material für LEIFIphysik.de aufbereitet. Meine Kollegin Jenny Meßinger-Koppelt hat die Fäden zwischen Dresden, Genf, Hamburg, Köln und Zeuthen in der Hand gehalten. Wir hoffen mit dem Material Impulse zur stärkeren Verankerung der Teilchenphysik in der Schule zu setzen und freuen uns über Ihre Rückmeldungen.

Jörg Maxton-Küchenmeister

Bereichsleiter Naturwissenschaften,
Joachim Herz Stiftung

HINWEISE ZUR ARBEIT MIT DEN MATERIALIEN

Die Frage, welche fundamentalen Prinzipien den Aufbau der Materie unseres Universums bestimmen und was sie „im Innersten zusammenhält“, ist seit jeher Gegenstand der Neugier und des Forschungsdrangs der Menschen. Das vorliegende Unterrichtsmaterial möchte Sie und Ihre Schüler in die faszinierende Welt der Teilchenphysik mitnehmen, um einige Antworten auf diese Frage zu finden.

Die Inhalte lassen sich in Form eines Spiralcurriculums behandeln, so dass eine wiederkehrende Beschäftigung mit den grundlegenden Konzepten der Elementarteilchenphysik im Physikunterricht in differenzierter Form und Tiefe, in unterschiedlichem Umfang, auf sich steigerndem Niveau und auf der Grundlage unterschiedlicher Vorkenntnisse möglich ist. So können wesentliche Inhalte zu den zentralen Begriffen „Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen“ vermittelt werden.

Der Band wird durch Informationen für Lehrkräfte und Aufgaben mit Lösungen abgerundet.

* Zur besseren Lesbarkeit der Unterrichtsmaterialien verwenden wir das generische Maskulinum. Selbstverständlich sind dabei stets alle Geschlechter gleichermaßen gemeint.

INHALT

SEITE 6 1 EINLEITUNG

SEITE 10 2 DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK – EINE THEORIE DER LADUNGEN UND WECHSELWIRKUNGEN

Seite	10	2.1	Einleitung
Seite	12	2.2	Aufbau der Materie und Wechselwirkungen
Seite	13	2.2.1	Himmelsmechanik und gravitative Wechselwirkung
Seite	15	2.2.2	Atome und elektromagnetische Wechselwirkung
Seite	17	2.2.3	Atomkerne und starke Wechselwirkung
Seite	20	2.2.4	Kernfusion und schwache Wechselwirkung
Seite	23	2.2.5	Kräfte und Wechselwirkungen
Seite	27	2.3	Ladungen als charakteristische Teilcheneigenschaften
Seite	27	2.3.1	Die elektrische Ladung
Seite	29	2.3.2	Die schwache Ladung
Seite	31	2.3.3	Die starke Ladung
Seite	37	2.3.4	Zusammenfassung: Die Ladungen der elementaren Anti-/Materieteilchen
Seite	37	2.4	Die vier fundamentalen Wechselwirkungen
Seite	38	2.4.1	Felder und Botenteilchen
Seite	39	2.4.2	Elektromagnetische Wechselwirkung: Photon
Seite	41	2.4.3	Schwache Wechselwirkung: W^+ -, W^- - und Z-Teilchen
Seite	45	2.4.4	Starke Wechselwirkung: Gluonen
Seite	49	2.4.5	Gravitative Wechselwirkung
Seite	49	2.5	Feynman-Diagramme
Seite	50	2.5.1	Vertices
Seite	51	2.5.2	Emission eines Botenteilchens
Seite	51	2.5.3	Absorption eines Botenteilchens
Seite	52	2.5.4	Paarvernichtung
Seite	52	2.5.5	Paarerzeugung
Seite	53	2.5.6	Energie-Impuls-Erhaltung und virtuelle Teilchen
Seite	54	2.5.7	Ladungserhaltung

Seite	54		2.5.8 Reaktionswahrscheinlichkeiten
Seite	55		2.5.9 Beispielprozesse
Seite	61	2.6	Das vollständige Ordnungsschema der Materieteilchen
Seite	62		2.6.1 Die drei Generationen der Materie- und Anti-Materieteilchen
Seite	66		2.6.2 Übersicht über alle Teilchenladungen
Seite	68	2.7	Das Brout-Englert-Higgs-Feld
Seite	69		2.7.1 Das Higgs-Teilchen und die Teilchenmassen
Seite	71		2.7.2 Notwendigkeit und Entstehung des BEH-Feldes
Seite	76	2.8	Hypothetische Teilchen (Exkurs)

SEITE 78 3 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

Seite	78	3.1	Inhaltliche Anknüpfungspunkte im Lehrplan
Seite	78	3.2	Vorkenntnisse
Seite	79	3.3	Lernziele
Seite	87	3.4	Didaktische Hinweise
Seite	92	3.5	Fachliche Hinweise

SEITE 102 4 AUFGABEN

SEITE 106 5 LÖSUNGEN

SEITE 111 6 ERGÄNZENDE MATERIALIEN

1 EINLEITUNG

Welche fundamentalen Prinzipien den Aufbau der Materie unseres Universums bestimmen und was sie „im Innersten zusammenhält“, ist seit jeher Gegenstand der Neugier und des Forschungsdrangs der Menschen. Ein enormer Erkenntnisfortschritt fand vor ca. 50 Jahren zwischen 1961 und 1973 statt, als das Theoriegebäude der Teilchenphysik entwickelt wurde. Damals musste es sich jedoch noch gegenüber anderen Modellen experimentell behaupten und wurde daher vorsichtig als „Standardmodell der Teilchenphysik“ bezeichnet. Diesen Namen hat es bis heute behalten, obwohl inzwischen klar geworden ist, dass diese nur auf drei Symmetrien und einer Symmetriebrechung basierende Quantenfeldtheorie die tiefstgehende und umfassendste physikalische Erkenntnis ist, die die Menschheit bisher über unser Universum gewinnen konnte. Das Standardmodell selbst ist jedoch auch 50 Jahre später nicht in allen deutschen Bundesländern ein fester Bestandteil des Physikunterrichts an Schulen. Wenn eine Auseinandersetzung damit vorgesehen ist, wird das Standardmodell zumeist auf die fundamentalen Bausteine der Materie und die daraus zusammensetzbaren Systeme reduziert. Dies kann dazu führen, dass die eigentlichen Erkenntnisse außen vor bleiben.

Das Standardmodell der Teilchenphysik besteht aus einem eleganten Theoriegebäude mit großer Vorhersagekraft. Dieses wird ergänzt von unentbehrlichen experimentellen Erkenntnissen, welche von der Theorie nicht a priori festgelegt werden können. Das Theoriegebäude basiert auf Ladungen als Ordnungsprinzip der Elementarteilchen, beschreibt die Wechselwirkungen zwischen ihnen über Symmetrieprinzipien und sagt daraus vorher,

welche Botenteilchen diese Wechselwirkungen vermitteln. Welche und wie viele Materiebausteine existieren, ist dagegen kein Teil des Theoriegebäudes, sondern eine experimentelle Erkenntnis, die in das Standardmodell aufgenommen wurde. Das Standardmodell ist daher insbesondere eine Theorie der Ladungen und Wechselwirkungen, und weniger eine Theorie der Teilchen. Dies tritt in den meisten – vor allem in den populärwissenschaftlichen – Darstellungen des Standardmodells in den Hintergrund.

Am Beispiel des Fußballspiels lässt sich dazu folgende Analogie bilden: Das Charakteristische für das Fußballspiel sind die Spielregeln, d. h. die erlaubten und verbotenen Wechselwirkungen der Spieler untereinander und mit dem Ball, sowie die Ordnungsprinzipien der Spieler von Torhüter über Abwehr-, Mittelfeld- und Sturmspieler. Wie viele Spieler insgesamt auf dem Feld stehen, ob sie in 4-4-2 oder 4-3-3 oder irgendeiner anderen Aufstellung spielen oder gar wie sie heißen, ist von Mannschaft zu Mannschaft und zwischen Feld-, Hallen- und Freizeitfußball verschieden und daher keine wesentliche Eigenschaft des Fußballspiels.

Eine Einführung des Standardmodells über die vollständige Liste der Elementarteilchen geht daher nicht nur an den wesentlichen Erkenntnissen des Standardmodells vorbei, sondern hat außerdem die Konsequenz, dass dabei Namen von Elementarteilchen oder gar zusammengesetzten Systemen präsentiert werden, die wenig Erkenntniswert für unsere Alltagswelt besitzen. Die wirklich übergrei-

fende Erkenntnis der Ladungen und Wechselwirkungen, die in faszinierender Weise zeigt, wie sich völlig unterschiedliche Phänomene und Prozesse auf gemeinsame physikalische Prinzipien zurückführen lassen, gerät dabei in den Hintergrund, obwohl gerade die Reduktion der Naturbeschreibung auf wenige Prinzipien das Wesen der Physik und ihre Faszination ausmacht.

Die folgenden Materialien verlangen daher die Bereitschaft, sich auf eine Sichtweise der Teilchenphysik einzulassen, die sich in der populärwissenschaftlichen Literatur oder in Schulbüchern bisher kaum widerspiegelt. Wir sind jedoch der Meinung, dass es sehr lohnend ist, sich den Erkenntnissen des Standardmodells mithilfe eines übergreifenden Ladungsbegriffes und dem Prinzip der Ladungserhaltung von elektrischen, schwachen und starken Ladungen anzunähern. Der Ladungsbegriff hat dabei für die Teilchenphysik eine ähnlich herausragende Bedeutung, wie z. B. die verschiedenen Energieformen und die Energieerhaltung für die gesamte Physik.

In diesem Band unserer Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik wird gezeigt, wie theoretisch mithilfe des Konzepts von Ladungen und Wechselwirkungen Prozesse beschrieben und vorhergesagt werden können. Im Band „Forschungsmethoden“ dieser Heftreihe werden experimentelle Methoden des Teilchennachweises und der Teilchenidentifikation diskutiert, wie sie die moderne Forschung mit Teilchenbeschleunigern oder kosmischen Teilchen anwendet. Aus dieser Kombination von Theorie und Experiment ergibt sich ein umfassendes Bild der modernen Forschung der Teilchen- und Astroteilchenphysik, das auf verschiedenen Niveaustufen der Schulphysik zugänglich ist.

Die vorliegenden Materialien liefern einen Einblick in die folgenden – bei weitem nicht vollständigen und sicher auch in der Rangfolge ihrer Wichtigkeit vom individuellen Blickwinkel abhängigen – wichtigsten Erkenntnisse der Teilchenphysik:

- Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf vier fundamentale Wechselwirkungen zurückführen, die jeweils verschiedene Phänomene unter dem Begriff einer Wechselwirkung vereinigen. Diese Phänomene umfassen u. a. die Entstehung und Umwandlung von Teilchen, den Aufbau von Materie sowie alle Kräfte zwischen Teilchen oder Systemen aus mehreren Teilchen (Kerne, Atome, Moleküle, makroskopische Körper).
- Drei dieser Wechselwirkungen werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien. Sie sind untrennbar jeweils mit einer für diese Wechselwirkung charakteristischen Ladung verbunden.
- Für jede dieser Ladungen gelten Erhaltungssätze, die es erlauben, zusammen mit Energie- und Impulserhaltung vorherzusagen, welche Prozesse in unserem Universum erlaubt und welche unmöglich sind.
- Die Ladungen ermöglichen es außerdem, die Elementarteilchen in einem Ordnungsschema in Multipletts anzuordnen, wobei die Theorie nicht vorhersagen kann, welche der möglichen Multipletts die Natur realisiert hat. Dies muss das Experiment feststellen.

- Nur Teilchen, die die entsprechende Ladung besitzen, unterliegen der jeweiligen Wechselwirkung.
- Bei sehr kleinen Abständen können die zu allen vier Wechselwirkungen gehörigen Kräfte einheitlich mithilfe der jeweiligen Ladungen beschrieben werden: Ihre Stärke ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands der wechselwirkenden Teilchen.
- Zwischen der klassischen Beschreibung der Kräfte durch Feldlinien bzw. Äquipotenziallinien und der quantenfeldtheoretischen Beschreibung durch die Emission bzw. Absorption von sogenannten Botenteilchen besteht bei kleinen Abständen eine enge Analogie.
- Die Phänomenologie unserer Alltagswelt ist sehr stark davon geprägt, dass nur zwei der fundamentalen Wechselwirkungen eine unendliche Reichweite besitzen, während die beiden anderen auf subatomare (sogar „subnukleare“) Abstände beschränkt sind. Diese endlichen Reichweiten haben unterschiedliche Ursachen.
- Die Anordnung der Elementarteilchen in Multipletts bezüglich der Ladungen besitzt bestimmte Symmetrieeigenschaften. Diese Symmetrien bilden die Grundlage der theoretischen Beschreibung der drei Wechselwirkungen der Teilchenphysik.

Zur Erzeugung der Massen von Elementarteilchen ist es notwendig, dass eine der Symmetrien durch das Brout-Englert-Higgs-Feld gebrochen („versteckt“) wird. Das BEH-Feld verursacht die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung und verlangsamt damit die Kernfusion in Sternen wie unserer Sonne so sehr, dass sie Milliarden von Jahren brennen. Außerdem wären ohne dieses Feld z. B. Elektronen masselos und damit keine Bildung von Atomen, Molekülen und Materie möglich.

In diese Liste wurden vor allem Forschungsergebnisse aufgenommen, die für die Phänomenologie unserer Erfahrungswelt wichtig sind, oder die die Reduktion auf wenige Prinzipien als das Ziel der physikalischen Erkenntnis deutlich machen. Sicher lassen sich nicht alle diese Erkenntnisse auf jedem Niveau und im Rahmen jeder Unterrichtsreihe zur Teilchenphysik an der Schule vermitteln, und sie können in der Schule auch nur in sehr unterschiedlicher Tiefe behandelt werden. Wir hoffen aber, dass die folgenden Materialien es Lehrkräften ermöglichen, sich in die Ergebnisse und Methoden der Teilchen- und Astroteilchenphysik einzuarbeiten, um dann nach eigener Auswahl, Schwerpunktsetzung und Anknüpfung an Unterrichtseinheiten und Curricula die Faszination der physikalischen Grundlagenforschung weiterzutragen.

2 DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK – EINE THEORIE DER LADUNGEN UND WECHSELWIRKUNGEN

2.1 EINLEITUNG

Die Elementarteilchenphysik (kurz: Teilchenphysik) ist ein Teilbereich der modernen Physik und stellt ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet dar, das sich erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt hat. Wie alle Naturwissenschaften entwickelt sich die Teilchenphysik im Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment. Den Forschern, die auf diesem Gebiet arbeiten, verdanken wir eine ganze Reihe grundlegender Beiträge zur modernen wissenschaftlichen Sicht auf die Welt: Denn die Teilchenphysik untersucht, aus welchen Bestandteilen Materie zusammengesetzt ist, welche Eigenschaften diese Grundbausteine haben und wie sie miteinander wechselwirken.

Eines der Ziele der modernen Teilchenphysik ist die Beschreibung aller im Universum ablaufenden Prozesse mit einer vereinheitlichten Theorie. Diese Theorie sollte alle Elementarteilchen und alle der zwischen ihnen ablaufenden Wechselwirkungen beschreiben. Man vermutet, dass es unmittelbar nach dem Urknall möglicherweise nur eine einzige Art von Wechselwirkung zwischen Teilchen gab. In der Geschichte der Physik ist es bereits mehrfach gelungen, verschiedene Wechselwirkungen innerhalb vereinheitlichter Theorien zu beschreiben (siehe Abb. 1).

Ein Beispiel hierfür ist die Theorie der Gravitation (im Folgenden: gravitative Wechselwirkung): Isaac Newton erkannte, dass sich die Fallbewegung von Körpern auf der Erde (beschrieben durch die Fallgesetze von Galilei) und die Bewegung der Planeten auf Bahnen um die Sonne (beschrieben durch die drei Keplerschen Gesetze) auf die gleiche Ursache zurückführen lassen: die gravitative

Wechselwirkung. Eine weitere Vereinheitlichung von bis dahin als unterschiedlich betrachteten physikalischen Prozessen gelang James Clerk Maxwell 1864: Er formulierte die Theorie des Elektromagnetismus, welche in der Lage ist, sowohl das Phänomen des Magnetismus als auch das der Elektrizität gemeinsam zu beschreiben. Newton und auch Maxwell trugen somit dazu bei, die Anzahl der zur Beschreibung der Natur aufgestellten Gesetzmäßigkeiten zu reduzieren, was sowohl zu einer Vereinfachung als auch zu einem besseren Verständnis der Naturgesetze führte. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelang ein weiterer Schritt in Richtung Vereinheitlichung: die Beschreibung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung als „Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung“ durch Abdus Salam, Sheldon Glashow und Steven Weinberg, die hierfür 1979 den Nobelpreis für Physik erhielten. Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung stellt jedoch keine vollkommene Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung zu einer einzigen Wechselwirkung dar, sondern sie beschreibt vielmehr die Beziehung beider Wechselwirkungen zueinander. Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung bilden gemeinsam das sogenannte „Standardmodell der Teilchenphysik“. Die Formulierung einer „Großen vereinheitlichten Theorie“, die diese drei Wechselwirkungen durch eine einzige fundamentale Wechselwirkung beschreibt, ist bisher noch nicht gelungen und Gegenstand aktueller Forschung. Eine sogenannte Weltformel würde die Vereinheitlichung aller vier bekannten Wechselwirkungen beinhalten und könnte beschreiben, was zum Zeitpunkt des Urknalls geschah, als diese – so die Vermutung – zu einer einzigen Wechselwirkung vereinigt waren.

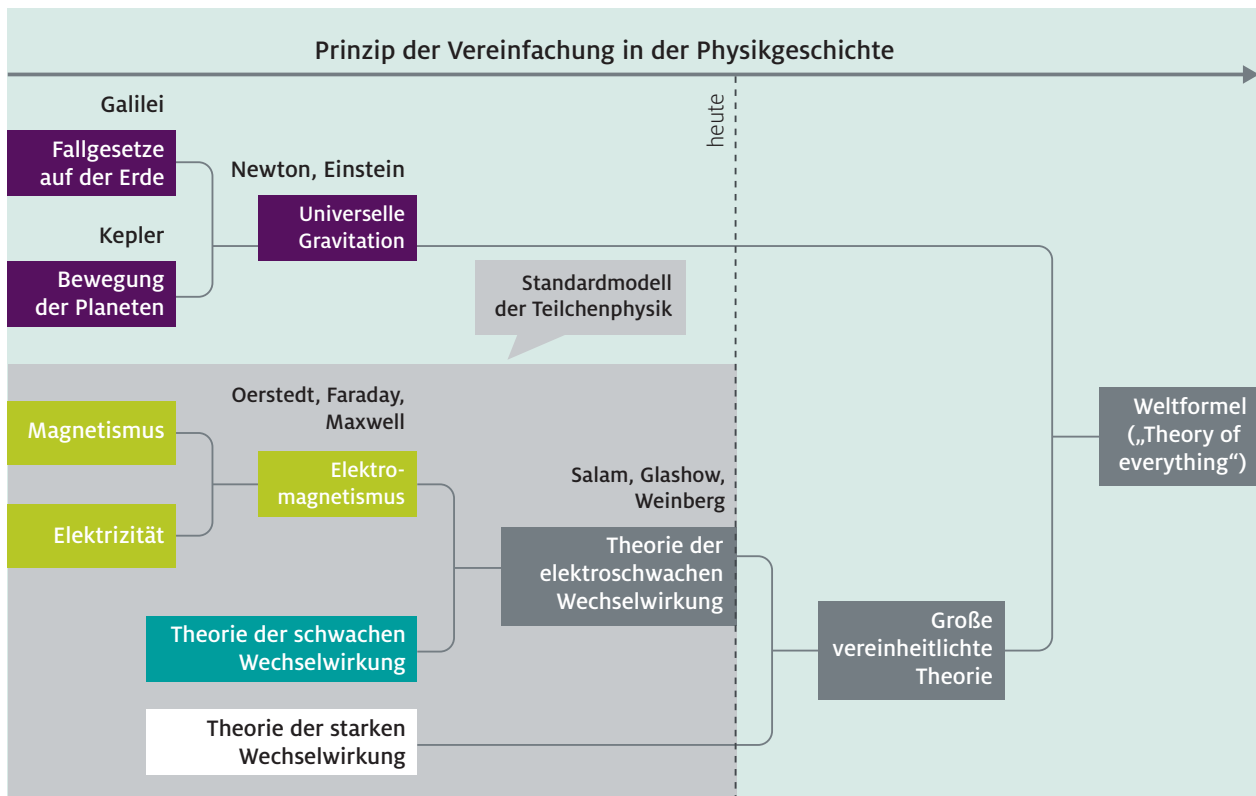


Abb. 1: Zeitlicher Fortschritt der Physik bei der Vereinheitlichung der Wechselwirkungen und Phänomene der Natur

Im Folgenden wird das Theoriegerüst, mit dem sich der Inhalt der Teilchenphysik beschreiben lässt, vorgestellt: das „Standardmodell der Teilchenphysik“. Der Name „Standardmodell“ ist aus Sicht eines Teilchenphysikers etwas profan, denn es handelt sich um eine herausragende Theorie, die seit Anfang der 1970er Jahre in zahlreichen Versuchen von Wissenschaftlern überprüft wird. Bei all diesen Experimenten wurde die Theorie immer wieder bestätigt.

Das Standardmodell basiert auf drei Begriffen, die sich gegenseitig bedingen und daher untrennbar miteinander verbunden sind: Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen. Zu den Elementarteilchen zählen beispielsweise Elektronen, die die Hülle von Atomen bilden. Elektronen besitzen eine elektrische Ladung, weshalb sie sich über die elektromagnetische Wechselwirkung gegenseitig abstoßen.

Die nachfolgenden Kapitel befassen sich mit einer Einführung in die drei Basiskonzepte des Standardmodells und der Beantwortung der folgenden Fragestellungen:

- Welche fundamentalen Wechselwirkungen werden benötigt, um den Aufbau der Materie und die Vorgänge im Universum zu beschreiben? Worin liegen ihre Gemeinsamkeiten und worin ihre Unterschiede?
- Inwiefern liegen diesen Wechselwirkungen Ladungen zugrunde und welche Rolle spielen diese bei der Charakterisierung der Elementarteilchen und bei der Vorhersage möglicher Prozesse?
- Wie kann man die bekannten Elementarteilchen ordnen, und welche Rollen spielen sie jeweils bei den Wechselwirkungen und beim Aufbau der Materie?

2.2 AUFBAU DER MATERIE UND WECHSELWIRKUNGEN

Könnte man mit dem Auge in einer dunklen Nacht so gut und weit sehen, wie es das Hubble Space Teleskop in seiner „Hubble Deep Field“ Aufnahme¹ tat, erschiene der Himmel voll von Galaxien – Gebilden aus Milliarden von Sternen, ähnlich wie unsere eigene Heimatgalaxie, die Milchstraße. Das Licht von den am weitesten entfernten Galaxien dieser Aufnahme benötigte über 13 Milliarden Jahre, um zu uns zu gelangen. Wie groß das Universum tatsächlich ist, wissen wir nicht: Licht aus noch größeren Entfernungen, das zu uns länger als 13,8 Milliarden Jahre (Alter des Universums) benötigen würde, hat uns noch nicht erreicht. Die Grenzen des Universums können wir daher noch lange nicht sehen, wir wissen nicht einmal, ob es überhaupt welche besitzt.



Abb. 2: Hubble Deep Field Aufnahme von tausenden Galaxien

(Quelle: NASA/ESA/S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team)

Man kann sich jedoch fragen: Wie sind diese Galaxien entstanden, warum leuchten die Sterne, woraus besteht alle Materie, was hält die Bestandteile zusammen? Sterne wie unsere Sonne bestehen aus ionisiertem Gas, Planeten unseres und anderer Sonnensysteme aus festen, flüssigen und gasförmigen Substanzen. Diese wiederum sind aus Atomen wie Wasserstoff H, Kohlenstoff C oder Sauerstoff O aufgebaut, die sich zu Molekülen wie Wasser H₂O oder Kohlendioxid CO₂ gruppieren können. Atome bestehen wiederum aus einem Atomkern und Elektronen, die diesen umgeben. Bei dieser Betrachtung stellt man sich fast automatisch die Frage: Geht diese Unterstruktur immer weiter, je genauer man nachsieht? Oder findet man irgendwann sogenannte Elementarteilchen, also unteilbare Objekte ohne Unterstruktur, aus denen unsere Welt schlussendlich besteht? Was bindet diese Elementarteilchen dann aneinander und wie? Diesen Fragen wird in den folgenden Kapiteln nachgegangen.

Experimentell hat man mit „Supermikroskopen“, den Teilchenbeschleunigern², herausgefunden, dass ein Elektron viel kleiner als 10^{-18} m sein muss, und damit mehr als tausendmal kleiner als ein Proton (ca. 10^{-15} m). Würde man ein Wasserstoffatom auf die Größe der Erde aufblähen, so wäre ein Proton etwa so groß wie ein Fußballstadion und ein Elektron sicher kleiner als ein Tennisball. Man ist sich daher heute sehr sicher, dass das Elektron ein Elementarteilchen ist, d. h. es besitzt keine Substruktur und ist nicht teilbar. Atomkerne sind keine Elementarteilchen, denn sie bestehen im Allgemeinen aus mehreren Protonen und Neutronen. Und auch Protonen und Neutronen sind keine Elementarteilchen, denn sie sind aus weiteren Teilchen zusammengesetzt, sogenannten Quarks. Die Quarks im Proton und Neutron sind nur vier- bis zehnmal schwerer als Elektronen und genauso klein. Quarks sind Elementarteilchen, d. h. sie besitzen wie das Elektron keine Substruktur und sind nicht teilbar.

¹ Eine 3D Animation der Aufnahme findet man auf http://hubblesite.org/video/445/news_release/2004-28.

² Siehe auch Band 2 „Forschungsmethoden“ dieser Heftreihe.

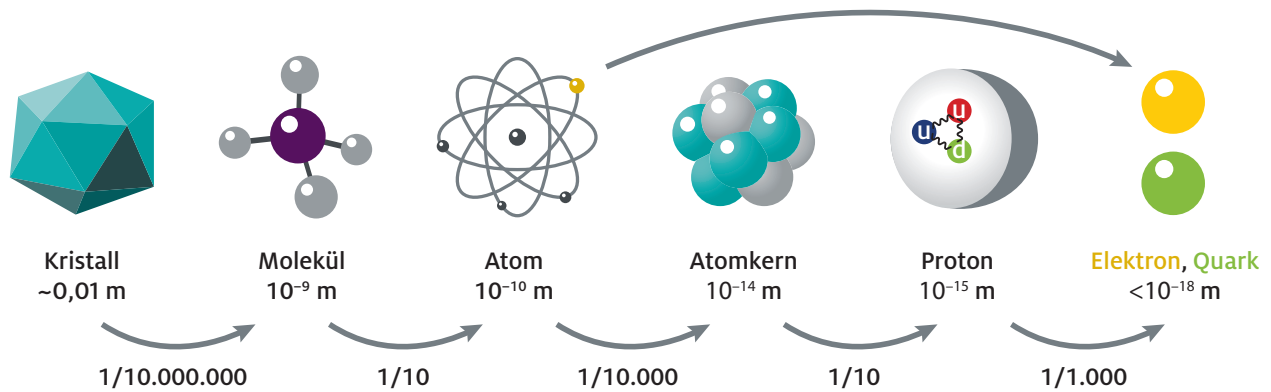


Abb. 3: Vom Kristall zu den Elementarteilchen

(Quelle: DESY, verändert)

Warum bewegen sich die Planeten um die Sonne und fliegen nicht einfach davon? Warum bilden sich Atome aus Atomkernen und Elektronen? Warum können mehrere Protonen mit Neutronen Atomkerne bilden, obwohl die Protonen sich aufgrund der gleichen elektrischen Ladungen gegenseitig abstoßen? Wie bilden Quarks Protonen und Neutronen? Einzig verantwortlich für all diese Phänomene sind die vier fundamentalen Wechselwirkungen der Natur: Die gravitative Wechselwirkung, die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung. Mithilfe des Basiskonzepts der fundamentalen Wechselwirkungen können dabei nicht nur Kräfte zwischen Teilchen, sondern auch Entstehung, Umwandlung und Vernichtung von Teilchen beschrieben werden. Alle bekannten Vorgänge in der Natur lassen sich auf diese vier Wechselwirkungen zurückführen, die in den folgenden Abschnitten genauer vorgestellt werden.

2.2.1 Himmelsmechanik und gravitative Wechselwirkung

Warum bewegen sich die Planeten um die Sonne, und warum bleiben die Luftmoleküle in der Atmosphäre um die Erde und fliegen nicht einfach davon? Verantwortlich dafür ist die anziehende Gravitationskraft F_G , die zwischen der Sonne und den Planeten oder der Erde und den Molekülen

wirkt. Diese Kraft hängt von den Massen m_1 und m_2 der Körper und ihrem Abstand r zueinander ab und hat entlang des Verbindungsvektors \vec{r} der Massen den Wert:

$$F_G = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \text{(Newtonsches Gravitationsgesetz)}$$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$ ist dabei die Gravitationskonstante. Das Minuszeichen bedeutet, dass der Kraftvektor $\vec{F}_G = F_G \cdot \vec{e}_r$ auf den jeweils anderen Körper immer entgegengesetzt zum Richtungsvektor \vec{e}_r gerichtet ist, welcher zu diesem Körper zeigt. Die Gravitationskraft ist also stets anziehend und niemals abstoßend.

Das Gravitationsgesetz war allerdings nicht die einzige Erkenntnis von Sir Isaac Newton. In seiner berühmten Schrift „Philosophiae naturalis Principia mathematica“ veröffentlichte Newton im Jahre 1687 die drei wichtigen Axiome der Mechanik: das Trägheitsgesetz, das Kraftgesetz und das Wechselwirkungsgesetz. Das Wechselwirkungsgesetz besagt wörtlich übersetzt:

Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung entgegengesetzt gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Das bedeutet beispielsweise, dass zum einen die Sonne auf die Erde eine anziehende Kraft ausübt und zum anderen die Erde auf die Sonne eine betragsmäßig gleich große sogenannte Gegenkraft ausübt. Zwischen Erde und Sonne besteht somit eine gravitative Wechselwirkung.

Da die Kraft nur vom Abstand der Körper abhängt, kann man für jeden Abstand eine potenzielle Energie definieren. Mathematisch lässt sich dies wie folgt ausdrücken: Legt man fest, dass die potenzielle Energie zweier massebehafteter Objekte bei unendlicher Entfernung voneinander gleich Null ist, so nimmt bei Annäherung der beiden Objekte ihre potenzielle Energie umgekehrt proportional zum Abstand r wie folgt ab:

$$E_{\text{pot}}(r) = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$$

Die Gravitationskraft lässt sich aus dieser potenziellen Energie mithilfe einer Ableitung nach r ermitteln.

Werden zwei Objekte mit einem Abstand r_1 um eine kleine Strecke $\Delta r = r_2 - r_1$ auf den Abstand r_2 voneinander entfernt, muss gegen die Gravitationskraft F_G die Arbeit

$$W = -F_G \cdot \Delta r = \Delta E_{\text{pot}} = E_{\text{pot}}(r_2) - E_{\text{pot}}(r_1)$$

verrichtet werden. An jedem Ort lässt sich also über die Umformung $F_G = -\frac{\Delta E_{\text{pot}}}{\Delta r}$ die Kraft aus der potenziellen Energie über eine Ableitung ermitteln:

$$F(r) = -\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\Delta E_{\text{pot}}}{\Delta r} = -\frac{dE_{\text{pot}}}{dr}$$

Diese Beziehung gilt nicht nur für die gravitative Wechselwirkung, sondern für alle Kräfte, die im Folgenden diskutiert werden. Umgekehrt lässt sich die Differenz der potenziellen Energien bei verschiedenen Abständen über das Integral

$$-\int_{r_1}^{r_2} F(r) \cdot dr = E_{\text{pot}}(r_2) - E_{\text{pot}}(r_1) = \Delta E_{\text{pot}}$$

aus der Kraft herleiten. Die potenzielle Energie ist also aus mathematischer Sicht die Stammfunktion der Kraft. Das Minuszeichen berücksichtigt, dass die für eine Erhöhung der potenziellen Energie nötige Arbeit mit Hilfe einer äußeren Krafteinwirkung verrichtet werden muss, die entgegengesetzt zur jeweils betrachteten Kraft zeigt.

Als quantitatives Beispiel kann die potenzielle Energie eines einzelnen Sauerstoff-Moleküls der Luft im Gravitationsfeld der Erde betrachtet werden. Soll der Abstand des Moleküls zur Erde vergrößert werden, muss Arbeit verrichtet werden, was zu einer Zunahme der potenziellen Energie führt. Wie sich die potenzielle Energie des Systems aus Sauerstoffmolekül und Erde in Abhängigkeit von deren Abstand verändert, ist in Abb. 4 dargestellt³.

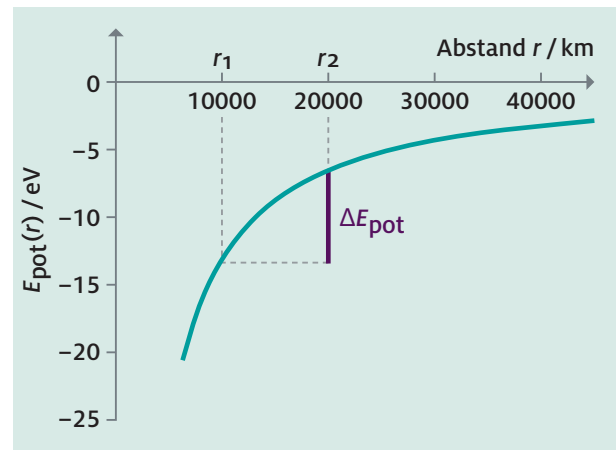


Abb. 4: Abhängigkeit der potenziellen Energie eines Sauerstoffmoleküls vom Abstand zum Erdmittelpunkt, wenn man den Nullpunkt der potenziellen Energie in einen unendlich weit entfernten Punkt legt.

³ Sauerstoffmoleküle, die sich in der Erdatmosphäre im Abstand $r = 6400$ km vom Erdmittelpunkt befinden, müssten eine Differenz in der potenziellen Energie von $\Delta E_{\text{pot}} = 20$ eV überwinden, um sich vollständig von der Erde zu lösen. Glücklicherweise besitzen sie selbst an heißen Tagen nur eine mittlere kinetische Energie von $E_{\text{kin}} = \frac{2}{3} k_B T = 0,04$ eV, mit der sie nur in einige wenige km Höhe oberhalb der Erdoberfläche gelangen, aber die Erdatmosphäre nicht verlassen können. Die Boltzmannkonstante $k_B = 86 \frac{\mu\text{eV}}{\text{K}}$ stellt dabei den Zusammenhang zwischen Temperatur und kinetischer Energie her.

2.2.2 Atome und elektromagnetische Wechselwirkung

Was bindet in Atomen die Elektronen an den Atomkern? Die elektrische Ladung eines Teilchens ergibt sich allgemein aus dem Produkt $Q = Z \cdot e$. Dabei ist e die Elementarladung⁴ und Z die elektrische Ladungszahl. Die elektrische Ladungszahl ist eine charakteristische Teilcheneigenschaft. Bei zwei elektrisch geladenen Teilchen entscheiden die Vorzeichen ihrer elektrischen Ladungen $Q_1 = Z_1 \cdot e$ und $Q_2 = Z_2 \cdot e$ darüber, ob sie sich aufgrund ihrer elektrischen Ladungen anziehen oder abstoßen. Ein Atomkern besteht aus elektrisch positiv geladenen Protonen (p) und elektrisch ungeladenen Neutronen (n). Jedes Proton besitzt die elektrische Ladungszahl $Z_p = +1$. Die elektrische Ladungszahl des Atomkerns entspricht also der Anzahl der Protonen im Kern und wird auch als (elektrische) Kernladungszahl Z_{kern} bezeichnet⁵. Für die elektrische Ladung eines Atomkerns gilt demnach $Q_{\text{kern}} = Z_{\text{kern}} \cdot e$. Jedes Elektron in der Atomhülle besitzt die elektrische Ladungszahl $Z_e = -1$ und somit eine negative elektrische Ladung von $Q_e = -1 \cdot e$. Teilchen, deren elektrische Ladungszahlen unterschiedliche Vorzeichen besitzen, wie der Atomkern und Elektronen, ziehen sich gegenseitig an. Teilchen mit gleichem Vorzeichen, wie etwa zwei Elektronen, stoßen sich gegenseitig ab. Soll der Abstand zwischen zwei elektrisch geladenen Teilchen mit den elektrischen Ladungszahlen Z_1 und Z_2 vergrößert werden, so hat dies wie bei der gravitativen Wechselwirkung eine Änderung der entsprechenden potenziellen Energie zur Folge. Dabei müssen zwei Fälle unterschieden werden: Besitzen beide Teilchen Ladungszahlen mit verschiedenen Vorzeichen, so vergrößert sich die potenzielle Energie der beiden Teilchen bei wachsendem Abstand (siehe Abb. 5a). Sind die Vorzeichen der Ladungszahlen hingegen gleich, so verringert sich ihre potenzielle Energie (siehe Abb. 5b).

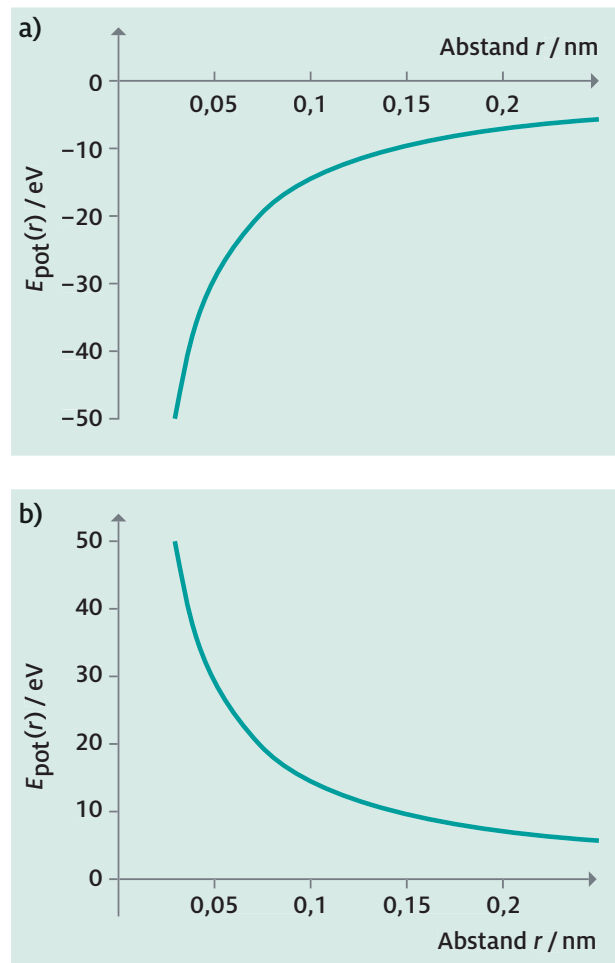


Abb. 5: Abhängigkeit der potenziellen Energie vom Abstand zwischen zwei Teilchen, die jeweils eine elektrische Ladungszahl mit Betrag $|Z|=1$ besitzen: a) bei unterschiedlichen Vorzeichen der elektrischen Ladungszahlen und b) bei gleichen Vorzeichen der elektrischen Ladungszahlen. Die Festlegung des Nullpunkts erfolgte für unendlichen Abstand.

Für die potenzielle Energie zweier elektrisch geladener Teilchen im Abstand r voneinander findet man genau wie bei der gravitativen Wechselwirkung, dass sich ihre potenzielle Energie umgekehrt proportional zum Abstand r wie folgt verändert:

⁴ Der Begriff „Elementarladung“ ist aus heutiger Sicht unglücklich gewählt, da mittlerweile Elementarteilchen entdeckt wurden (die Quarks), deren elektrische Ladung betragsmäßig kleiner sind als e .

⁵ Die elektrische Kernladungszahl Z_{kern} wird häufig einfach nur mit Z bezeichnet.

INFOKASTEN: KOPPLUNGSPARAMETER

Zu jeder heute bekannten fundamentalen Wechselwirkung gehört ein universeller Kopplungsparameter α_i . Dieser Parameter ist charakteristisch für die jeweilige Wechselwirkung und ein Maß für ihre „Stärke“, also z. B. dafür, wie groß die Kraft auf die Teilchen ist, die der Wechselwirkung unterliegen. Der Kopplungsparameter wird auch „Kopplungskonstante“ genannt. Im vorliegenden Material wird der Begriff Kopplungsparameter bevorzugt, weil α_i bei allen fundamentalen Wechselwirkungen leicht (logarithmisch) vom Abstand der wechselwirkenden Teilchen abhängt und somit nicht wirklich konstant ist.

Jeder Kopplungsparameter ist über die Beziehung $\alpha_i = \frac{g_i^2}{4 \cdot \pi}$ mit einer sogenannten Kopplungsstärke g_i verknüpft, die ebenfalls ein Maß für die „Stärke“ der jeweiligen Wechselwirkung ist. Im Falle der elektromagnetischen Wechselwirkung ist die Kopplungsstärke g_{em} gegeben durch $g_{em} = \frac{e}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \hbar \cdot c}}$ mit e : Elementarladung.

$$E_{\text{pot}}(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r} \\ = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r}$$

mit $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$ (elektrische Feldkonstante).

Der Ausdruck auf der rechten Seite wird im Folgenden dabei helfen, zunächst die gravitative Wechselwirkung und die elektromagnetische Wechselwirkung, später sogar alle vier fundamentalen Wechselwirkungen zu vergleichen. Dazu wurde als Vorfaktor das Produkt $\hbar \cdot c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ eingeführt (mit dem Planckschen Wirkungsquantum $\hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi} = 0,658 \text{ eV} \cdot \text{fs}$ und der Lichtgeschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{fm}}{\text{fs}}$). Da das Produkt $\hbar \cdot c$ multipliziert mit $\frac{1}{r}$ bereits die richtige Einheit (MeV) für die potenzielle Energie liefert, muss die neu definierte Größe $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar \cdot c} = \frac{1}{137,0359991} \approx \frac{1}{137}$ eine einfache Zahl ohne Einheit sein⁶. Man nennt sie den elektromagnetischen Kopplungsparameter. Sie ist eine der wichtigsten und am genauesten gemessenen Zahlen in unserem Universum, und es haben sich schon sehr viele Forscher (bisher vergeblich) ihre Köpfe zerbrochen, warum sie gerade diesen Wert hat.

Der Betrag der anziehenden bzw. abstoßenden Coulombkraft zwischen zwei Teilchen hängt von ihren elektrischen Ladungszahlen Z_1 und Z_2 und dem Abstand r zwischen ihnen ab und hat entlang des Verbindungsvektors \vec{r} der elektrischen Ladungen den Wert:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

(Coulombsches Gesetz).

Genau wie bei der gravitativen Wechselwirkung erhält man die vektorielle Kraft $\vec{F}_C = F_C \cdot \vec{e}_{\vec{r}}$ auf das jeweils andere Teilchen über den Richtungsvektor $\vec{e}_{\vec{r}}$. Die Coulombkraft in Richtung des Verbindungsvektors der beiden Teilchen ergibt sich aus der potenziellen Energie über die Ableitung $F_C = -\frac{dE_{\text{pot}}}{dr}$ (siehe Kapitel 2.2.1). Besitzen die

elektrischen Ladungszahlen Z_1 und Z_2 ein entgegengesetztes Vorzeichen, so ist F_c negativ und die Coulombkraft anziehend. Besitzen die elektrischen Ladungszahlen Z_1 und Z_2 hingegen das gleiche Vorzeichen, so ist F_c positiv und die Coulombkraft abstoßend.

Dabei gilt wie bei der gravitativen Wechselwirkung, entsprechend dem Newtonschen Wechselwirkungsgesetz, dass die Kraft des ersten Teilchens auf das zweite Teilchen entgegengesetzt gleich der Kraft des zweiten Teilchens auf das erste Teilchen ist. Die beiden Teilchen stehen also miteinander in Wechselwirkung.

Die Coulombkraft F_c besitzt eine ähnliche Struktur wie die Gravitationskraft F_G : Der Betrag beider Kräfte nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen den betrachteten Körpern mit dem Quadrat des Abstands ab. Um die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung und der gravitativen Wechselwirkung, z. B. im Wasserstoffatom, vergleichen zu können, muss man analog zu den Ladungszahlen auch das Produkt der Massen $m_p \cdot m_e$ in ein Produkt einheitenloser „Massenzahlen“ und einheitenbehafteter „Elementarmassen“ umformen. Da es im Gegensatz zur Elementarladung e bei der gravitativen Wechselwirkung jedoch keine „Elementarmasse“ für die Definition einer „Massenzahl“ gibt, setzt man für jedes System der Einfachheit halber die Massenzahl gleich 1 und erhält so z. B. für die Gravitationskraft im Wasserstoffatom

$$F_G(r) = -G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{r^2} = -\hbar \cdot c \cdot \alpha_{\text{grav}}^{\text{pe}^-} \cdot \frac{1 \cdot 1}{r^2}$$

mit dem Kopplungsparameter der gravitativen Wechselwirkung zwischen Proton (p) und Elektron (e⁻)

$\alpha_{\text{grav}}^{\text{pe}^-} = \frac{G \cdot m_p \cdot m_e}{\hbar \cdot c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$. Im Wasserstoffatom ist die elektromagnetische Anziehung zwischen Proton und Elektron also $\frac{\alpha_{\text{em}}}{\alpha_{\text{grav}}^{\text{pe}^-}} \approx 2 \cdot 10^{39}$ mal stärker als die Anziehung durch die gravitative Wechselwirkung.

Dieses Verhältnis hängt von den Massen der wechselwirkenden Teilchen ab, weil der Kopplungsparameter α_{grav} nicht eindeutig definierbar ist. So ist zum Beispiel das Verhältnis des elektromagne-

tischen Kopplungsparameters und des Kopplungsparameters der gravitativen Wechselwirkung zwischen zwei Protonen $\frac{\alpha_{\text{em}}}{\alpha_{\text{grav}}^{\text{pp}}} \approx 10^{36}$ immer noch so groß, dass die gravitative Wechselwirkung für die Teilchenphysik bei den heute erreichbaren Energien völlig vernachlässigbar ist.

2.2.3 Atomkerne und starke Wechselwirkung

Der Atomkern eines Sauerstoffatoms (¹⁶O) besteht aus acht Protonen und acht Neutronen. Aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung stoßen sich die elektrisch positiv geladenen Protonen gegenseitig ab. Warum ist der Atomkern des Sauerstoffatoms dennoch stabil und zerfällt nicht in einzelne Protonen und Neutronen? Eine ähnliche Frage stellt sich hinsichtlich der Nukleonen, d. h. Protonen und Neutronen: Ein Proton beispielsweise besteht aus zwei elektrisch positiv geladenen Up-Quarks u mit $Z_u = +\frac{2}{3}$ und einem elektrisch negativ geladenen Down-Quark d mit $Z_d = -\frac{1}{3}$. Die beiden Up-Quarks stoßen sich aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung ab. Warum ist das Proton dennoch stabil und zerfällt nicht in einzelne Quarks? Die Anziehung sowohl zwischen Protonen und Neutronen als auch zwischen Quarks aufgrund der gravitativen Wechselwirkung ist zu schwach, um die Protonen und Neutronen im Atomkern bzw. die Quarks im Proton aneinander zu binden. Der Grund dafür, dass bestimmte Atomkerne oder Protonen und Neutronen stabil sind, ist die sogenannte starke Wechselwirkung.

Im vorausgegangenen Kapitel wurde erläutert, dass die elektromagnetische Wechselwirkung nur zwischen Teilchen wirkt, die eine elektrische Ladung besitzen. Entsprechend muss es eine Teilcheneigenschaft geben, die dafür verantwortlich ist, dass bestimmte Teilchen (u. a. Quarks) der starken Wechselwirkung unterliegen. Diese Eigenschaft ist ebenfalls eine Ladung, die sogenannte starke Ladung oder auch Farbladung \vec{C} . Der Begriff Farbe hat dabei nichts mit optischen Farben zu tun, liefert aber, wie später noch deutlich werden wird, hilfreiche Vorstellungen um das Konzept der starken Ladung und ihren vektoriellen Charakter zu erfassen.

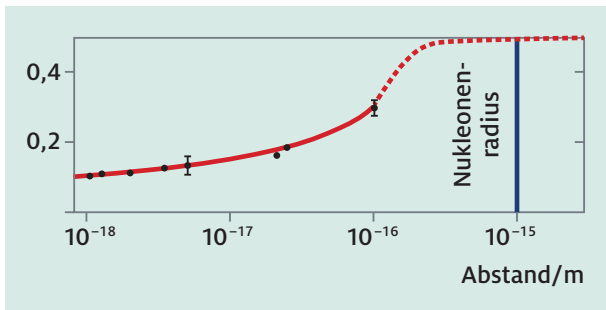


Abb. 6: Der starke Kopplungsparameter α_s hängt vom Abstand der miteinander wechselwirkenden Quarks ab. Die Abbildung zeigt, dass die theoretische Berechnung (rote Kurve) und die experimentellen Messwerte (schwarze Punkte) darin übereinstimmen, dass α_s bei Verkleinerung des Abstands kleiner wird. Bei Vergrößerung des Abstands jenseits von 0,2 fm (gestrichelte Linie) ist der Kopplungsparameter innerhalb der „Theorie der starken Wechselwirkung“ (Quanten-Chromodynamik (QCD)) nicht mehr genau berechenbar. Es wird jedoch angenommen, dass er etwa wie skizziert verläuft.

(Quelle: BESIII Collaboration, <https://inspirehep.net/record/1240091/plots>, verändert)

Aufgrund der starken Ladung bewirkt die starke Wechselwirkung sowohl eine Anziehung der Quarks untereinander als auch eine Anziehung der Quarks verschiedener Nukleonen. Analog zur elektromagnetischen und zur gravitativen Wechselwirkung gibt es auch für die starke Wechselwirkung einen Kopplungsparameter (α_s), der ein Maß dafür ist, wie stark die Wechselwirkung der Quarks untereinander ist. Sie liegt – je nach Abstand der Quarks – bei Werten im Bereich $\alpha_s(0,2 \text{ fm}) \approx \frac{1}{2}, \dots, \alpha_s(0,001 \text{ fm}) \approx \frac{1}{10}$ (siehe Abb. 6). Da der Kopplungsparameter α_s größer als der elektromagnetische Kopplungsparameter $\alpha_{\text{em}} \approx \frac{1}{137}$ ist, überwiegt die Anziehung der Quarks aufgrund der starken Wechselwirkung gegenüber der Abstoßung aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Warum sind nun bestimmte Atomkerne wie etwa ^{16}O stabil? In einem Wassermolekül H_2O verbinden sich Sauerstoff- und Wasserstoffatome miteinander. Wir wissen, dass die Atome eine Unterstruktur haben und aus elektrisch geladenen Teilchen bestehen – auch wenn jedes Atom nach außen hin neutral erscheint. Wenn nun die Atome einander sehr nahe kommen, überlagern sich ihre Elektronenhüllen, und es kommt zur Elektronenpaarbindung, die eine Bindung zwischen den Atomen bewirkt. Ähnliches passiert zwischen Nukleonen, die einen stabilen Atomkern bilden. Hier besteht die Unterstruktur aus Quarks (Proton p (uud), Neutron n (udd)). Wie in Abb. 7 dargestellt, lässt sich die Bindung zwischen den Nukleonen mit einem Bild beschreiben, das analog zur Elektronenpaarbindung ist: Ähnlich wie elektrisch neutrale Atome sich zu Molekülen binden können, indem sie einige Elektronen „kovalent“ gemeinsam besitzen oder austauschen, kann man die Bindung von farbneutralen (also nach außen hin nicht stark geladenen) Protonen und Neutronen zu Atomkernen dadurch verstehen, dass auch sie kurzzeitig gemeinsame Teilchen besitzen oder austauschen, nämlich Quarks⁷. Diese Quarkpaarbindung ist bei bestimmten Abständen stärker als die elektrische Abstoßung der Protonen im Kern.

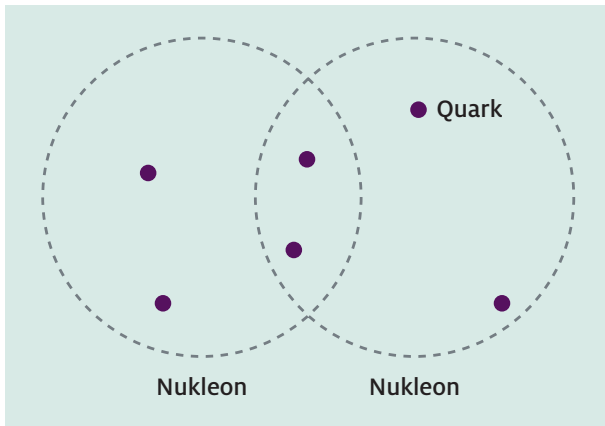


Abb. 7: Zwei Nukleonen mit jeweils drei Quarks im Bild der „kovalenten“ Quarkpaarbindung

Genau wie der tiefere Grund der Molekülbindung ist, dass in Atomen durch die Coulombkraft gebundene Elektronen vorhanden sind, ist der Grund der Bindung von Atomkernen das Vorhandensein von Quarks, welche der starken Wechselwirkung unterliegen.

Die durch diese Wechselwirkung hervorgerufenen Kräfte können nicht nur jeweils Nukleonen bzw. Quarks aneinander binden, sondern auch Quarks und ihre Anti-Teilchen⁸, die sogenannten Anti-Quarks. Analog zur Gravitationskraft und zur Coulombkraft beschreibt man die starke Kraft durch die potenzielle Energie von Quarks⁹. Mathematisch findet man für die potenzielle Energie als Funktion des Abstands r :

$$E_{\text{pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + k \cdot r$$

Dabei steht $\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2$ symbolisch für das Skalarprodukt der starken Ladungen, das in spezieller Weise nach Regeln der Quantenmechanik ausgewertet werden muss. Mit $k = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}}$ tritt neben α_s ein zweiter charakteristischer Parameter für die starke Wechselwirkung auf, der gleich diskutiert wird.

Für die Wechselwirkung zwischen einem Quark und einem Anti-Quark, deren starke Ladungen sich zu Null addieren, ergibt sich $\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2 = -\frac{4}{3}$ und damit erhält man, genau wie bei entgegengesetzt elektrisch geladenen Teilchen, aus der potenziellen Energie

$$E_{\text{pot}} = -\hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\frac{4}{3}}{r} + k \cdot r$$

über die Ableitung $F_s = -\frac{dE_{\text{pot}}}{dr}$ eine anziehende starke Kraft¹⁰:

$$F_s = -\hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\frac{4}{3}}{r^2} - k$$

In Abb. 8 ist die potenzielle Energie eines Quarks und eines Anti-Quarks aufgrund der starken Wechselwirkung in Abhängigkeit von ihrem Abstand abgebildet. Bei kleinem Abstand weist sie genau wie bei der gravitativen und der elektromagnetischen Wechselwirkung eine $\frac{1}{r}$ -Abhängigkeit auf.

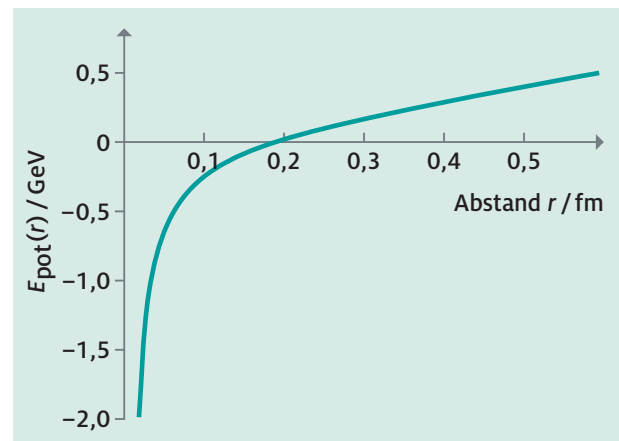


Abb. 8: Potenzielle Energie eines Quarks und eines Anti-Quarks in Abhängigkeit ihres Abstandes: Im Unterschied zur potenziellen Energie der gravitativen Wechselwirkung und der elektromagnetischen Wechselwirkung erreicht sie keinen maximalen Wert, sondern steigt für große Abstände immer weiter an.

⁸ Was ein Anti-Teilchen ist, wird in Kapitel 2.3.4 genauer diskutieren.

⁹ Die angegebenen Gleichungen für die potenzielle Energie und die starke Kraft gelten prinzipiell nur für Teilchen, die eine Farbladung besitzen. Der lineare Term $k \cdot r$ in der Gleichung der potenziellen Energie (und damit der Summand k im Kraftgesetz) ist an die Existenz von Farbladungen gekoppelt, bleibt also im Falle von farbneutralen Teilchen nicht als farbladungsunabhängiger Term stehen.

¹⁰ Bei dieser Ableitung wurde $\alpha_s(r)$ als konstant angenommen, da es sich im Vergleich zu den anderen r -Abhängigkeiten der potenziellen Energie wesentlich langsamer ändert. Wie man an $\alpha_s(0,2 \text{ fm}) \approx \frac{1}{2}$, ..., $\alpha_s(0,001 \text{ fm}) \approx \frac{1}{10}$ sieht, vermindert sich $\alpha_s(r)$ nur um einen Faktor 5 bei einer Verringerung des Abstands um einen Faktor 200, also viel langsamer als proportional zu r .

Das besondere Merkmal der starken Wechselwirkung ist jedoch, dass die Steigung der potenziellen Energie zweier Quarks für sich vergrößernde Abstände nicht gegen Null strebt, wie es bei der potenziellen Energie, der gravitativen und der elektromagnetischen Wechselwirkung der Fall ist¹¹. Stattdessen steigt die potenzielle Energie der Quarks ab $r \approx 0,2 \text{ fm}$ linear an¹², besitzt also eine konstante Steigung. Die anziehende Kraft erreicht dort einen konstanten Wert von $F_s = -k = -930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} = -150 \text{ kN}$, einen Betrag, mit dem man auf der Erde eine Masse von 15 t anheben könnte!

Der Term $k \cdot r$ in der potenziellen Energie hat also zur Folge, dass bei zwei Teilchen, die sich aufgrund der starken Kraft anziehen – im Gegensatz zur elektrischen oder gravitativen Anziehung – ab einem Abstand von etwa $r = 1 \text{ fm}$ für jede weitere Vergrößerung ihres Abstands um Δr immer die gleiche Arbeit $\Delta W = k \cdot \Delta r$ verrichtet werden müsste. Die notwendige Energie für eine vollständige Trennung wäre also unendlich hoch, so dass es unmöglich ist, Quarks oder Anti-Quarks räumlich vollständig voneinander zu isolieren. Einzelne (Anti-)Quarks treten somit nie auf! Würde man dennoch auf irgendeine Weise versuchen, Quarks voneinander zu separieren, so genügt eine Arbeit von $W = k \cdot \Delta r = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} \cdot 0,7 \text{ fm} = 650 \text{ MeV}$, um neue Quark-Anti-Quark-Paare zu erzeugen¹³, die zusammen mit den separierten Quarks neue gebundene Systeme bilden (Abb. 9).

Dieses Phänomen nennt man Confinement (engl. für Gefangenschaft). Das Confinement hat zur Folge, dass Teilchen mit Farbladung nur in gebundenen Systemen und niemals isoliert vorkommen. Bereits bei einer zusätzlichen Separation eines (Anti-)Quarks von $\Delta r = 0,7 \text{ fm}$ über den typischen Bindungsabstand von $r \approx 0,3 - 1,3 \text{ fm}$ hinaus entstehen neue Quark-Anti-Quark-Paare¹⁴. Die Reichweite der starken Wechselwirkung zwischen Quarks ist damit effektiv auf unter 1-2 fm beschränkt.

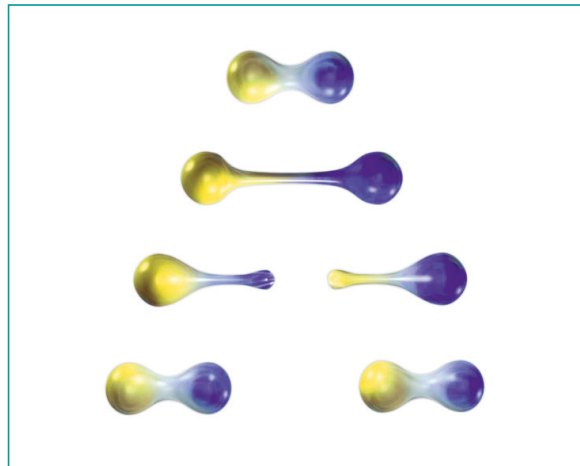
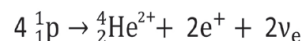


Abb. 9: Quarks lassen sich räumlich nicht beliebig weit voneinander trennen. Stattdessen entsteht ein Paar aus einem Quark und einem Anti-Quark. Diese Teilchen bilden mit den ursprünglichen Quarks wieder gebundene Zustände (die Farbgebung der Quarks steht in keinem Zusammenhang mit deren Farbladung).

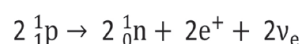
(Quelle: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung)

2.2.4 Kernfusion und schwache Wechselwirkung

Das Leben auf der Erde wäre ohne das Licht, das die Sonne aussendet, nicht möglich. Warum aber scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren? Im Inneren der Sonne finden Kernfusionen statt, bei denen jeweils vier Protonen zu einem Heliumkern fusionieren, der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Bei dieser Kernfusion entsteht nicht nur das Licht (Photonen), sondern auch weitere Teilchen. Dabei handelt es sich um Positronen e^+ , die Anti-Teilchen der Elektronen mit positiver elektrischer Ladung sowie um die elektrisch neutralen „Partner“ der Elektronen, die sogenannten Elektron-Neutrinos ν_e .



Damit dieser Prozess stattfinden kann, müssen sich zwei Protonen in zwei Neutronen umwandeln:



¹¹ Wenn hier und im Folgenden von der potenziellen Energie einer Wechselwirkung gesprochen wird, ist dies eine sprachliche Vereinfachung. Dabei ist wie gewohnt stets die potenzielle Energie von Teilchen gemeint, die dieser Wechselwirkung unterliegen.

¹² Genau genommen ist der Anstieg nicht exakt linear. Allerdings kann der $\frac{1}{r}$ -abhängige Term ab diesem Abstand vernachlässigt werden.

¹³ Weshalb genau diese Energie notwendig ist, wird in den Fachlichen Hinweisen: Massen von Quarks als Konstituenten in gebundenen Zuständen erläutert.

¹⁴ Derartige Prozesse finden permanent bei der Wechselwirkung der extrem energiereichen kosmischen Strahlung mit Teilchen der Erdatmosphäre sowie bei Experimenten an Teilchenbeschleunigern wie dem LHC am CERN statt.

Diese Umwandlung nennt man β^+ -Umwandlung. Da die Masse von Neutronen etwas größer ist als die von Protonen, wird für diesen Prozess zusätzliche Energie benötigt. Diese Energie stammt aus der gewonnenen Bindungsenergie des Heliums.

Und woher kommt nun das Licht, also die Photonen? Die Positronen, die bei den Kernfusionen entstehen, treffen in der Sonne jeweils auf ein freies Elektron und vernichten sich mit diesem in einem Prozess, der Paarvernichtung oder Annihilation genannt wird. Dabei entsteht ein neues Teilchenpaar¹⁵, nämlich zwei Photonen γ : $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

Die Photonen und die Neutrinos verlassen schließlich die Sonne. Die Umwandlung von Protonen in Neutronen findet sehr selten statt. Weil es in der Sonne jedoch eine riesige Anzahl von Protonen gibt, entstehen seit über vier Milliarden Jahren ununterbrochen genügend Photonen, sodass Leben auf der Erde entstehen konnte und immer noch möglich ist.

Doch wie geschieht die Umwandlung ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + e^+ + \nu_e$ eines Protons in ein Neutron? Die elektromagnetische Wechselwirkung kann für diese Umwandlung nicht verantwortlich sein, weil sie nur zwischen elektrisch geladenen Teilchen wirkt, bei dem obigen Prozess jedoch auch ein elektrisch neutrales Elementarteilchen, das Elektron-Neutrino ν_e , entsteht. Genauso wenig kann die starke Wechselwirkung die Ursache für die Umwandlung eines Protons in ein Neutron sein, denn es entstehen Elementarteilchen, die keine starke Ladung besitzen (Positron e^+ und Elektron-Neutrino ν_e). Verantwortlich für die Umwandlung muss also eine weitere fundamentale Wechselwirkung sein, die man schwache Wechselwirkung nennt. Sie wird u. a. deswegen „schwache Wechselwirkung“ genannt, weil die aufgrund dieser Wechselwirkung stattfindenden Prozesse im heutigen Universum vergleichsweise sehr selten ablaufen.

INFOKASTEN: β^- -UMWANDLUNG

Die schwache Wechselwirkung ermöglicht auch den umgekehrten Prozess zur Kernfusion in der Sonne, die sogenannte β^- -Umwandlung. Dabei wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt, wobei ein Elektron und ein Anti-Neutrino $\bar{\nu}_e$ entstehen: ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + e^- + \bar{\nu}_e$. Die schwache Wechselwirkung ist damit auch für das Phänomen der Radioaktivität verantwortlich.

Genauso wie die elektrische Ladung die Ursache der elektromagnetischen Wechselwirkung und die starke Ladung die Ursache der starken Wechselwirkung ist, hat auch die schwache Wechselwirkung ihre Ursache in einer korrespondierenden Ladung. Diese nennt man schwache Ladung. Die zugehörige schwache Ladungszahl wird mit I bezeichnet¹⁶. Protonen, Neutronen, Positronen und Neutrinos besitzen alle eine schwache Ladung und können entsprechend an Prozessen der schwachen Wechselwirkung (hier der β^+ -Umwandlung) teilnehmen. Anhand seiner Masse, seiner elektrischen und der schwachen Ladungszahlen sowie seiner Farbladungsvektoren lässt sich ein Teilchen eindeutig charakterisieren.

Analog zur elektromagnetischen Wechselwirkung und zur gravitativen Wechselwirkung existiert für die schwache Wechselwirkung ebenfalls ein Kopplungsparameter (α_w), der ein Maß für die Stärke der Wechselwirkung ist. Dieser Kopplungsparameter besitzt den Wert $\alpha_w \approx \frac{1}{30}$ und liegt damit zwischen dem starken Kopplungsparameter

¹⁵ Es kann kein einzelnes Photon entstehen, da dann je nach Bezugssystem der Energie- und/oder Impulserhaltungssatz verletzt wäre.

¹⁶ Die schwache Ladung (auch: schwache Isospinladung) besitzt, wie die Farbladung, ebenfalls einen Vektorcharakter. Dabei hat die schwache Ladung eine ähnliche Struktur wie der Spin: Von ihren drei Komponenten ($I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)}$), ist quantenmechanisch nur eine festgelegt. Hierfür wird üblicherweise die Komponente $I^{(3)}$ gewählt, die im Folgenden als schwache Ladungszahl I bezeichnet wird (siehe Fachliche Hinweise: Schwache Ladung). Für das Produkt zweier schwacher Ladungen wird kurz $I_1 \cdot I_2$ geschrieben, obwohl dieses Produkt eigentlich quantenmechanisch als Skalarprodukt $\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2$ ausgewertet werden muss (siehe Fachliche Hinweise: Ladungsprodukt).

$\alpha_s(0,2 \text{ fm}) \approx \frac{1}{2}, \dots, \alpha_s(0,001 \text{ fm}) \approx \frac{1}{10}$ und dem elektromagnetischen Kopplungsparameter $\alpha_{\text{em}} \approx \frac{1}{137}$.

Für die potenzielle Energie von schwach geladenen Teilchen als Funktion ihres Abstands r gilt ein ähnliches Gesetz wie bei den anderen Wechselwirkungen:

$$E_{\text{pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{-\frac{r}{\lambda_w}}$$

Aufgrund des exponentiellen Faktors mit dem Reichweiteparameter $\lambda_w = 0,002 \text{ fm}$, dessen Ursprung später noch geklärt wird, strebt die potenzielle Energie für sich vergrößernde Abstände sehr schnell gegen Null (siehe Abb. 10).

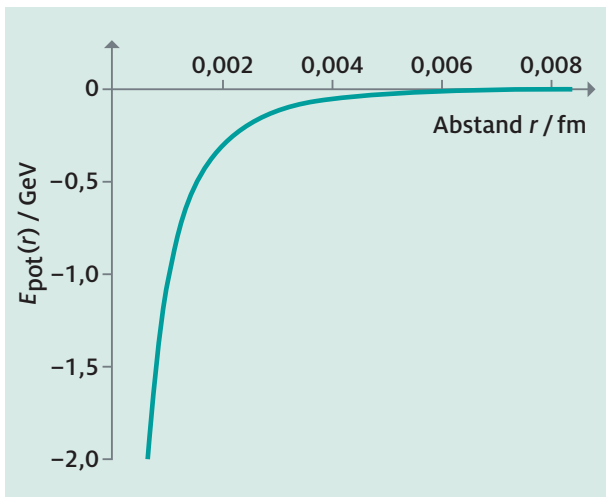


Abb. 10: Potenzielle Energie zweier schwach wechselwirkender Teilchen mit der schwachen Ladung $|I| = \frac{1}{2}$ in Abhängigkeit ihres Abstandes. Die Festlegung des Nullpunkts der potenziellen Energie erfolgte für unendlichen Abstand.

Zwischen Teilchen, deren Abstand groß im Vergleich zu $0,002 \text{ fm}$ ist, wirkt die schwache Wechselwirkung daher praktisch nicht. Über die Ableitung $F_w = -\frac{dE_{\text{pot}}}{dr}$ lässt sich ein Ausdruck für die schwache Kraft angeben:

$$F_w(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2} \left(1 + \frac{r}{\lambda_w}\right) e^{-\frac{r}{\lambda_w}}$$

Dieser Zusammenhang findet jedoch kaum Verwendung, da sich aufgrund der kurzen Reichweite der schwachen Wechselwirkung keine gebundenen Zustände bilden. Dies ist eine Besonderheit, die nur die schwache Wechselwirkung besitzt.

In Abb. 11 sind noch einmal die potenziellen Energien der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Wechselwirkung als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Teilchen mit zwei verschiedenen Skalen abgebildet. Diese Abbildung lässt sowohl einen Vergleich des Betrages der potenziellen Energien der verschiedenen Wechselwirkungen als auch einen Vergleich des Verhaltens der Funktionen der potenziellen Energie zu. So entsteht der Verlauf der potenziellen Energie der elektromagnetischen Wechselwirkung aus einer Funktion, die $\sim \frac{1}{r}$ als einzige Abhängigkeit vom Abstand r besitzt. Wie ein Vergleich der linken und rechten Darstellung in Abb. 11 zeigt, ändert sich die Kurvenform daher nicht, wenn man die Achsen jeweils mit demselben Faktor umgekehrt skaliert (in Abb. 11 wurde unten im Vergleich zu oben die r -Achsenskala durch 25 geteilt und die E -Achsenskala mit 25 multipliziert). Die elektromagnetische Wechselwirkung und damit auch die gravitative Wechselwirkung sehen also bei allen Abständen gleich aus. Man sagt, sie besitzen keine charakteristische Längenskala¹⁷ und haben unendliche Reichweite.

Für kleine Abstände (unten) zeigt die Kurve der potenziellen Energie der starken Wechselwirkung genau wie die der elektromagnetischen Wechselwirkung eine $\frac{1}{r}$ -Abhängigkeit, da dort der lineare Term $k \cdot r$ noch sehr klein ist. Bei größeren Abständen hat sie einen anderen Verlauf. Die Kurve nähert sich nicht der horizontalen Achse an, sondern steigt wegen des nun dominierenden linearen Terms ab $r \approx 0,2 \text{ fm}$ mit konstanter Steigung immer weiter an. Deshalb sieht sie nicht bei allen Abständen gleich aus, wie der Vergleich von unterer und oberer Darstellung zeigt. Man sagt, sie hat eine charakteris-

¹⁷ Eine charakteristische Längenskala λ einer Funktion der Orte r liegt z. B. dann vor, wenn die Funktion explizit einen Parameter mit der Dimension „Länge“ besitzt, wie z. B. die Wellenlänge bei einer Sinusfunktion $\sin \frac{2\pi r}{\lambda}$ oder den Längenparameter im Exponenten einer Exponentialfunktion $e^{-\frac{r}{\lambda}}$. Sie bewirkt bei Abständen von $r = \lambda$ eine besonders prägnante Formänderung. Auch wenn die Funktion aus einer Summe zweier Terme unterschiedlicher r -Abhängigkeit besteht, die nur bei einem bestimmten Wert $r = \lambda$ die gleiche Größenordnung haben und sonst jeweils der eine oder der andere stark überwiegt, ergibt sich bei dieser charakteristischen Skala eine besonders deutliche Formänderung.

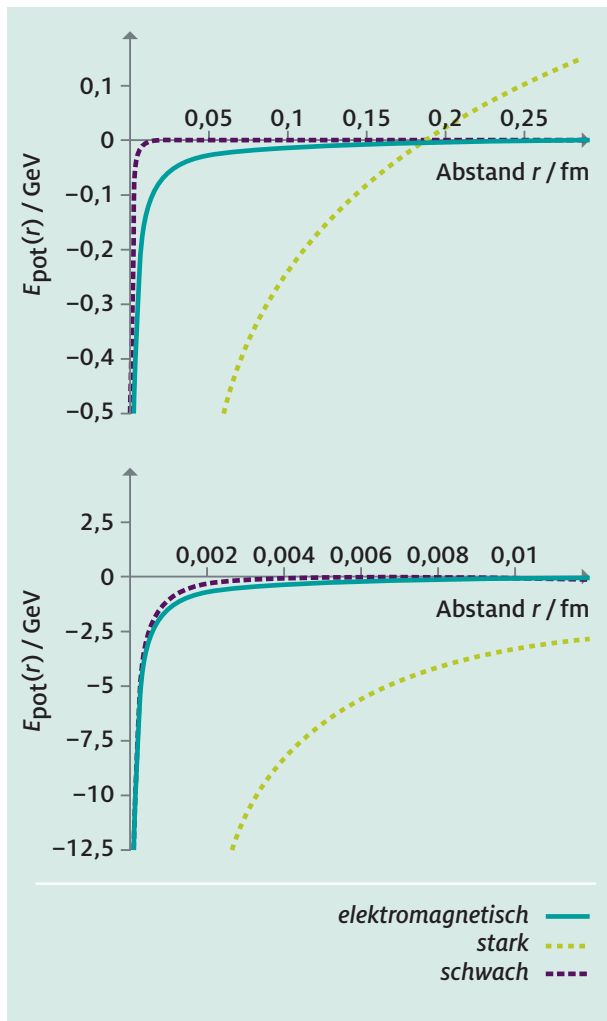


Abb. 11: Potenzielle Energien als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Teilchen für zwei um den Faktor 25 unterschiedliche Skalen. Für die potenziellen Energien der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung wurden die Kurven für die Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Positron berechnet, für die potentielle Energie der starken Wechselwirkung für ein Quark und ein Anti-Quark.

tische Längenskala von 0,2 fm, unterhalb und oberhalb derer sie sich unterschiedlich als Funktion des Abstands verhält.

Der Kurvenverlauf der potenziellen Energie der schwachen Wechselwirkung ähnelt für Abstände unterhalb von 0,002 fm ebenfalls dem Verlauf der potenziellen Energie der elektromagnetischen Wechselwirkung mit der typischen $\frac{1}{r}$ -Abhängigkeit (unten). Allerdings strebt die Kurve für sich vergrößernde Abstände viel schneller gegen Null (oben). Dies ist durch den exponentiellen Term in der potenziellen Energie der schwachen Wechselwirkung begründet. Die schwache Wechselwirkung besitzt also ebenfalls eine charakteristische Längenskala, die man als endliche Reichweite $\lambda_w = 0,002$ fm bezeichnet.

2.2.5 Kräfte und Wechselwirkungen

Nachdem die vier fundamentalen Wechselwirkungen im Detail erläutert wurden, werden im Folgenden die zugrundeliegenden Kraftgesetze, die Reichweiten und Kopplungsparameter miteinander verglichen.

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede aller Wechselwirkungen erkennt man, wenn man die Kraftgesetze miteinander vergleicht: Bei allen vier Kraftgesetzen ist der Betrag der Kraft zwischen den miteinander wechselwirkenden Teilchen im Falle kleiner Abstände ($r < 0,001$ fm) stets umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes (siehe Tabelle 1). Dies ist, wie in Kapitel 2.4.1 noch ausführlicher diskutiert wird, darauf zurückzuführen, dass unser Universum drei-dimensional ist: Die Feldlinien verteilen sich mit wachsendem Abstand über eine gemäß $4\pi r^2$ wachsende Kugeloberfläche, wodurch die Feldliniendichte und somit auch die Kraft proportional zu $\frac{1}{r^2}$ abnimmt.

WECHSELWIRKUNG	KRAFTGESETZ FÜR $r < 0,001 \text{ fm}$	REICHWEITE	KOPPLUNGSPARAMETER α^{18}
gravitativ	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{\text{grav}} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{\text{grav}} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{\text{em}} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{\text{em}} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Tabelle 1: Die Kraftgesetze für sehr kleine Abstände, die zugehörigen Reichweiten sowie die Kopplungsparameter der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Die gravitativen Kopplungsparameter gelten für Massen zwischen Elektron- und Protonmasse, die starken für Abstände bis zu $\sim 0,001 \text{ fm}$.

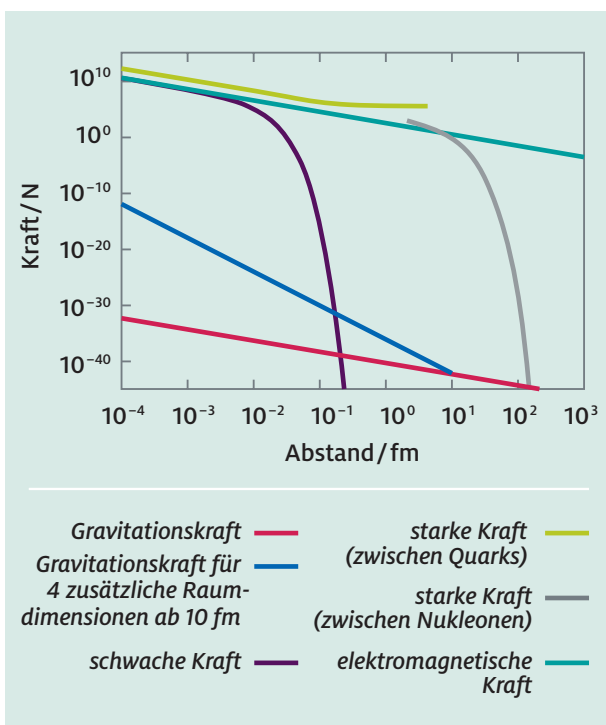


Abb. 12: Kräfte als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Teilchen. Für die elektromagnetische Kraft, die schwache Kraft und die Gravitationskraft ist jeweils die Kraft zwischen einem Elektron und einem Positron dargestellt. Für die starke Kraft wurde als Beispiel die anziehende Kraft zwischen Quark und Anti-Quark bzw. die Kraft zwischen zwei Nukleonen aufgrund der „kovalenten“ Quarkpaarbindung gewählt.

Wie man Tabelle 1 entnehmen kann, unterscheiden sich die Kräfte für sehr kleine Abstände ($r < 0,001 \text{ fm}$) nur noch darin, wie groß die zugehörigen Kopplungsparameter sind und welche Ladungen die wechselwirkenden Teilchen besitzen. Die Ausnahme bildet die gravitative Wechselwirkung, für die man bisher keine Größe definieren kann, die der Ladung entspricht und die im Gegensatz zu den anderen Kräften immer anziehend ist. Dies ist in der Tabelle dadurch symbolisiert, dass in dem Zähler des Gravitationsgesetzes „-1“ statt eines Produktes zweier Ladungen geschrieben steht. Die Massen der wechselwirkenden Teilchen bzw. Körper wurden, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, im Kopplungsparameter α_{grav} berücksichtigt.

In Abb. 12 sind alle bisher diskutierten Kräfte als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Teilchen abgebildet. Man beachte, dass das Bild so gezeichnet ist, dass sich zwischen jedem Teilstrich auf den Achsen der zugehörige Wert um einen Faktor 10 ändert (doppelt logarithmische Skalierung). Für eine Vergrößerung des Abstands auf der Abszisse um einen Teilstrich (also um einen Faktor 10) verkleinert sich sowohl die elektromagnetische Kraft als auch die Gravitationskraft auf der Ordinate um zwei Teilstriche (also um einen Faktor $10^2 = 100$). Kraftgesetze, bei denen die Kraft proportional zu $\frac{1}{r^2}$

ist, ergeben in einer solchen Auftragung Geraden mit festgelegter negativer Steigung.

Man erkennt, dass alle Kraftgesetze für kleine Abstände genau diese Steigung besitzen. Für die Gravitationskraft und die Coulombkraft gilt die $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit auch für beliebig große Abstände ($r \rightarrow \infty$), was man als unendliche Reichweite bezeichnet. Die Kraft der starken Wechselwirkung bleibt ab einem Abstand von etwa 0,2 fm jedoch ungefähr konstant, was bei einer versuchten räumlichen Trennung von Quark und Anti-Quark über diesen Abstand hinaus rasch zur Bildung neuer Quark–Anti-Quark-Paare führt (Confinement). Sie besitzt daher effektiv eine begrenzte Reichweite von einigen fm. Die schwache Kraft strebt bereits bei subnuklearen Distanzen mit wachsendem Abstand exponentiell gegen Null und besitzt daher eine noch viel kleinere endliche Reichweite von ca. $2 \cdot 10^{-18}$ m.

Die $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit der Gravitationskraft ist experimentell allerdings nur für Abstände $r > 50 \mu\text{m}$ überprüft. Möglicherweise gibt es in unserem

Universum zusätzliche, nur winzig ausgedehnte Raumdimensionen, in die nur die Feldlinien der gravitativen Wechselwirkung eindringen können. Unterhalb der maximalen Ausdehnung der zusätzlichen Dimensionen würde die Gravitationskraft bei n zusätzlichen Dimensionen einer $\frac{1}{r^{2+n}}$ -Abhängigkeit folgen, da sich die Feldlinien viel schneller in diese weiteren Dimensionen verteilen könnten. In Abb. 12 ist ein willkürliches Beispiel für vier zusätzliche Dimensionen mit Ausdehnung von 10 fm eingezeichnet, das die Gravitationskraft so modifizieren würde, dass sie bei Abständen von ca. 10^{-10} fm, ein Stück außerhalb des linken Bildrandes, ähnlich stark wäre wie die anderen Kräfte. Eine interessante Spekulation, die z. B. in so genannten String-Theorien verfolgt wird!

Alle aus dem Alltag bekannten Kräfte – und damit auch Phänomene – lassen sich auf die vier fundamentalen Wechselwirkungen zurückführen: die gravitative, elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung. In Tabelle 2 sind für jede Wechselwirkungen einige Beispiele aufgelistet.

FUNDAMENTALE WECHSELWIRKUNG	BEISPIELE FÜR KRÄFTE UND PHÄNOMENE AUS ALLTAG UND NATUR
gravitative Wechselwirkung	Schwerkraft, Hangabtriebskraft, Planetenbahnen, Luftdruck, Auftrieb
elektromagnetische Wechselwirkung	Reibungskraft, Muskelkraft, Motorkraft, Molekülbindungskraft, Adhäsionskraft, Bremskraft, elektrischer Strom, Radiowellen, Ausrichten einer Kompassnadel, elastischer Stoß zweier Körper, Explosion von Dynamit, optische Phänomene, gebundene Zustände aus Protonen und Elektronen (Atome), Gasdruck, Umwandlung eines Elektrons und eines Positrons in zwei Photonen (Paarvernichtung)
starke Wechselwirkung	Bindung von Quarks in Protonen und Neutronen, Kernkraft (Kraft zwischen Protonen und Neutronen), Radioaktiver α -Zerfall, Kernspaltung, Kernkraftwerke
schwache Wechselwirkung	Radioaktive β -Umwandlung, Umwandlung eines Protons in ein Neutron bei der Kernfusion in der Sonne und in einer Wasserstoffbombe, Instabilität von Neutronen und Myonen

Tabelle 2: Die vier fundamentalen Wechselwirkungen und die auf sie zurückführbaren Phänomene und Kräfte aus der Natur und dem Alltag

INFOKASTEN: VERGLEICH VON STÄRKEN

Es ist wichtig, zwischen den Stärken von Wechselwirkungen und den Stärken von Kräften zu unterscheiden, da diese nicht auf dieselbe Weise quantitativ verglichen werden können. Wechselwirkung ist ein Oberbegriff, welcher Kräfte sowie die Umwandlung, Erzeugung und Vernichtung von Teilchen vereint. Bei der Berechnung der Stärke einer Kraft zwischen zwei Teilchen fließt neben dem Kopplungsparameter und dem Produkt der relevanten Ladungszahlen bzw. -vektoren (kurz: Ladungsprodukt) auch der Abstand der beiden Teilchen ein. Für Wechselwirkungsprozesse wie Paarerzeugung und Paarvernichtung lässt sich hingegen gar kein Abstand festlegen. Statt des Wertes einer Kraft liefert hier die Wahrscheinlichkeit des Prozesses das Maß für die „Stärke“ der Wechselwirkung. Diese Wahrscheinlichkeit ist proportional zum Kopplungsparameter α_i der jeweiligen Wechselwirkung. Es ist daher sinnvoll, die Stärken von Wechselwirkungen und die Stärken von Kräften unterschiedlich wie folgt zu charakterisieren:

STÄRKE VON WECHSELWIRKUNGEN
$\sim \alpha$
STÄRKE VON KRÄFTEN
$\sim \alpha \cdot \text{Ladungsprodukt} \cdot \text{Abstandsgesetz}$

In der Literatur finden sich häufig Tabellen, welche die Stärken von starker, schwacher und elektromagnetischer Kraft miteinander ins Verhältnis setzen. In ihnen wird der Wert für die starke Kraft meist als Referenz auf 1 gesetzt, der Wert für die schwache Kraft wird dann beispielsweise mit 10^{-12} - 10^{-15} angegeben. Solche Tabellen sind allerdings mit äußerster Vorsicht zu betrachten. Wie aus Abb. 12 ersichtlich ist, besitzen diese drei Kräfte – außer bei sehr kleinen Abständen – sehr unterschiedliche Abstandsabhängigkeiten, d. h. auch ihr Verhältnis ist sehr stark vom Abstand abhängig. Die in einem Stärkevergleich von Kräften angegebenen Werte können also lediglich eine Betrachtung für einen ganz bestimmten Abstand sein. Das Verhältnis bei einem anderen Abstand kann um viele Größenordnungen davon abweichen.

Die schwache Kraft bspw. verläuft nur für kleine Abstände proportional zu $\frac{1}{r^2}$ (also linear in der doppelt logarithmischen Auftragung von Abb. 12). Bei diesen kleinen Abständen ist tatsächlich das Verhältnis der Stärken der Kräfte (für identische jeweilige Ladungsprodukte) nur durch das Verhältnis der Kopplungsparameter α_i gegeben. Selbiges gilt für die Stärken der Wechselwirkungen. Für größere Abstände ist die schwache Kraft exponentiell abstandsabhängig. Dies bewirkt, dass sie bei Abständen von größer als etwa 0,1 fm im Vergleich zu den anderen Kräften weitaus schneller abfällt. Bereits bei den typischen Abständen der Kernphysik (\sim fm), auf die sich die meisten der oben genannten Tabellen beziehen, ist sie viele Größenordnungen kleiner als die anderen Kräfte. Dies hat historisch zum Namen „schwache Kraft“ geführt.

2.3 Ladungen als charakteristische Teilcheneigenschaften

Welche Eigenschaften charakterisieren ein Teilchen? Was unterscheidet ein Quark von einem Elektron und ein Elektron von einem Neutrino? Warum befinden sich in der Atomhülle nur Elektronen, aber keine Neutrinos? Woran liegt es, dass innerhalb eines Protons oder Neutrons neben Quarks nicht auch Elektronen zu finden sind? Warum nehmen nicht alle Teilchen an allen Wechselwirkungen teil? Die Antworten auf diese Fragen wurden in den Jahren 1961-1973 gefunden und bilden seitdem die Grundlage der etwas bescheiden „Standardmodell der Teilchenphysik“ genannten Theorie über die Ladungen der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen in unserem Universum. Diese Theorie, die seit ihrer Entwicklung in allen Experimenten immer wieder eindrucksvoll bestätigt wurde, ist das Grundgerüst der Teilchenphysik. Sie liefert einen Dreiklang von Basiskonzepten, die miteinander untrennbar verbunden sind: Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen (siehe Abb. 13).

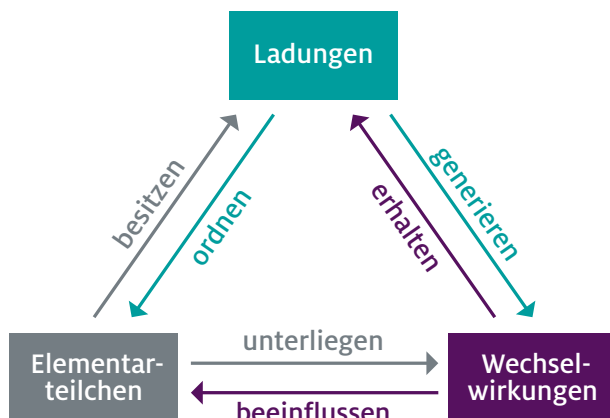


Abb. 13: Das Konzept der Theorie des „Standardmodells der Teilchenphysik“

Das grundlegende Basiskonzept des Standardmodells ist das Ladungskonzept. Mit seiner Hilfe lassen sich Antworten auf die oben aufgeworfenen Fragen finden. Die Ladungen des Standardmodells besitzen u. a. die folgenden vier Merkmale:

1. Ladungen sind fundamentale und unveränderliche Eigenschaften eines Teilchens, die es zusammen mit seiner Masse eindeutig charakterisieren und die angeben, welchen Wechselwirkungen es unterliegt.
2. Eine wichtige Entdeckung der Teilchenphysik ist, dass Ladungen nur bestimmte Werte annehmen können, die in gleichmäßigen Abständen zueinander liegen – man sagt, Ladungen sind „gequantelt“.
3. Die Ladung eines Systems, das aus mehreren Teilchen besteht, ergibt sich aus der Summe der Ladungen der einzelnen Teilchen.
4. Bei allen Prozessen, die in der Natur ablaufen, gilt Ladungserhaltung. Das bedeutet, dass die Summe der Ladungen aller Teilchen vor dem Prozess gleich der Summe der Ladungen aller Teilchen nach dem Prozess ist.

2.3.1 Die elektrische Ladung

Die wohl bekannteste Ladung ist die elektrische Ladung $Q = Z \cdot e$. Dabei ist e die Elementarladung, welche quadratisch in den elektromagnetischen Kopplungsparameter

$$\alpha_{\text{em}} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar \cdot c} = \frac{1}{137,0359991} \approx \frac{1}{137}$$

einght und somit die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung angibt (vergleiche Kapitel 2.2.2). Ein charakteristisches Unterscheidungsmerkmal verschiedener Teilchen ist ihre elektrische Ladungszahl $Z = \frac{Q}{e}$, die positiv, negativ oder Null sein kann. Das Elektron beispielsweise besitzt die elektrische Ladungszahl $Z_{e^-} = -1$, das Proton die elektrische Ladungszahl $Z_p = +1$.

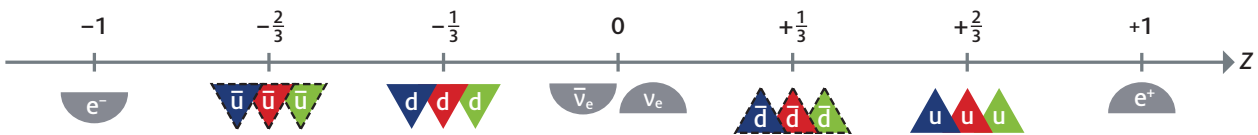


Abb. 14: Die elektrischen Ladungszahlen Z von Elektron (e^-), drei Anti-Up-Quarks (\bar{u}), drei Down-Quarks (d), Elektron-Neutrino (ν_e), Anti-Elektron-Neutrino ($\bar{\nu}_e$), drei Anti-Down-Quarks (\bar{d}), drei Up-Quarks (u) und Positron (e^+) (von links nach rechts). Die Anti-Materieteilchen (Positron, Anti-Up-Quark, Anti-Down-Quark, Anti-Elektron-Neutrino) besitzen Ladungszahlen gleichen Betrags wie ihre zugehörigen Materieteilchen, nur mit umgekehrtem Vorzeichen.

Bei Elementarteilchen hat man für ihre elektrischen Ladungszahlen bisher nur die Werte $Z = -1, -\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, 0, +\frac{1}{3}, +\frac{2}{3}$ und $+1$ gefunden (siehe Abb. 14). Elementarteilchen mit einer elektrischen Ladungszahl vom Betrag > 1 wurden bisher nicht entdeckt.

Die elektrische Ladungszahl eines zusammengesetzten Systems wie z. B. eines Protons ergibt sich aus der Summe der elektrischen Ladungszahlen der einzelnen Teilchen. So besitzt beispielsweise das Proton p (uud), welches aus zwei Up-Quarks u und einem Down-Quark d besteht, die elektrische Ladungszahl:

$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) = +1$$

Entsprechend besitzt ein Wasserstoffatom H die elektrische Ladungszahl:

$$Z_H = Z_p + Z_{e^-} = 1 + (-1) = 0$$

Alle Teilchen, die eine elektrische Ladung besitzen, unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Das Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl eines Teilchens gibt an, wie es mit anderen elektrisch geladenen Teilchen wechselwirkt: Wie man in der Gleichung für die Coulombkraft F_c aus Kapitel 2.2.2 sieht, stoßen sich Teilchen mit elektrischen Ladungszahlen gleichen Vorzeichens ab, und Teilchen mit elektrischen Ladungszahlen entgegengesetzten Vorzeichens ziehen sich an. Die

elektromagnetische Wechselwirkung bewirkt jedoch nicht nur, dass sich elektrisch geladene Teilchen anziehen oder abstoßen. Aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung können auch Teilchenumwandlungen stattfinden, d. h. es können Teilchen vernichtet werden und neue Teilchen entstehen. Beispielsweise können sich aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung ein Elektron e^- und ein Positron e^+ in zwei Photonen γ umwandeln:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Da bei diesem Umwandlungsprozess das Elektron und das Positron, die vor der Umwandlung vorlagen, im Endzustand nicht mehr vorliegen, nennt man diesen Prozess auch „Paarvernichtung“. Bei dieser Wechselwirkung ist die elektrische Ladungszahl Z (und damit auch die elektrische Ladung $Q = Z \cdot e$) erhalten, d. h. die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor dem Wechselwirkungsprozess ist gleich der Summe der elektrischen Ladungszahlen nach dem Wechselwirkungsprozess (elektrische Ladungszahlerhaltung):

$$\begin{aligned} Z_{e^-} + Z_{e^+} &= Z_\gamma + Z_\gamma \\ -1 + (+1) &= 0 + 0 \\ 0 &= 0 \end{aligned}$$

Diesen Umwandlungsprozess macht man sich in der Praxis beispielsweise bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) zunutze (siehe Abb. 15).

Das Phänomen, dass Ladungen nicht nur zu anziehenden bzw. abstoßenden Kräften zwischen den Teilchen führen, sondern darüber hinaus ebenfalls Umwandlungen der Teilchen ermöglichen, findet sich für alle drei Ladungen (elektromagnetisch, stark, schwach) des Standardmodells. Daher spricht man in der Teilchenphysik im Allgemeinen von einer von der jeweiligen Ladung hervorgerufenen Wechselwirkung und verwendet den Kraftbegriff nur in den Fällen, in denen sich eine Wechselwirkung tatsächlich durch eine Kraft (Anziehung/Abstoßung) äußert. Kräfte sind also nur einer von mehreren Aspekten des Basiskonzepts der fundamentalen Wechselwirkungen.

2.3.2 Die schwache Ladung

Genau wie die elektrische Ladung zur elektromagnetischen Wechselwirkung gehört, gehört zur schwachen Wechselwirkung eine schwache Ladung bzw. die schwache Ladungszahl I . Dabei handelt es sich genau wie bei der elektrischen Ladungszahl um eine charakteristische Teilcheneigenschaft, welche die in Kapitel 2.3 angeführten Merkmale besitzt. Alle Materieteilchen (und somit auch alle Anti-Materieteilchen) besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von $I = +\frac{1}{2}$ oder $I = -\frac{1}{2}$ (siehe Abb. 16)¹⁹. Da die schwache Ladung angibt, ob Teilchen der schwachen Wechselwirkung unterliegen oder nicht und kein Materieteilchen die schwache Ladungszahl

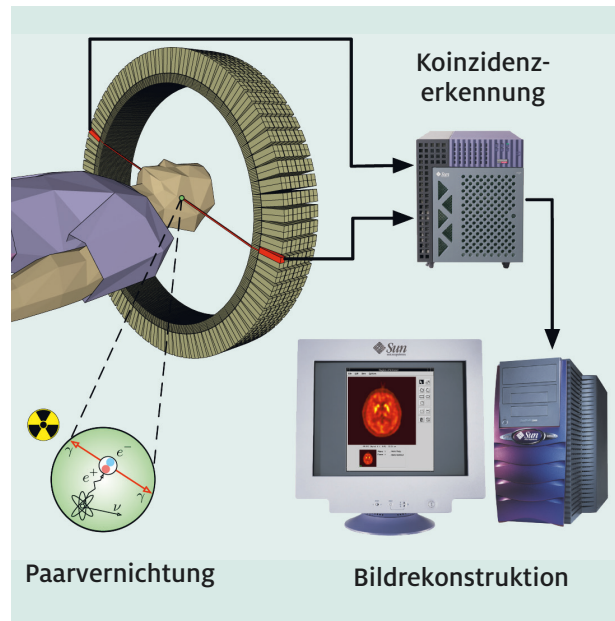


Abb. 15: Prinzip der Positronen-Emissions-Tomographie. Einem Lebewesen wird eine schwach radioaktive Substanz injiziert, die innerhalb des Körpers zerfällt und dabei Positronen aussendet (β^+ -Strahler). Diese Positronen annihilieren mit im Körper befindlichen Elektronen (Paarvernichtung), wodurch zwei Photonen entstehen. Die beiden Photonen verlassen den Körper gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen und können von kreisförmig um den Körper angeordneten Detektoren registriert werden.

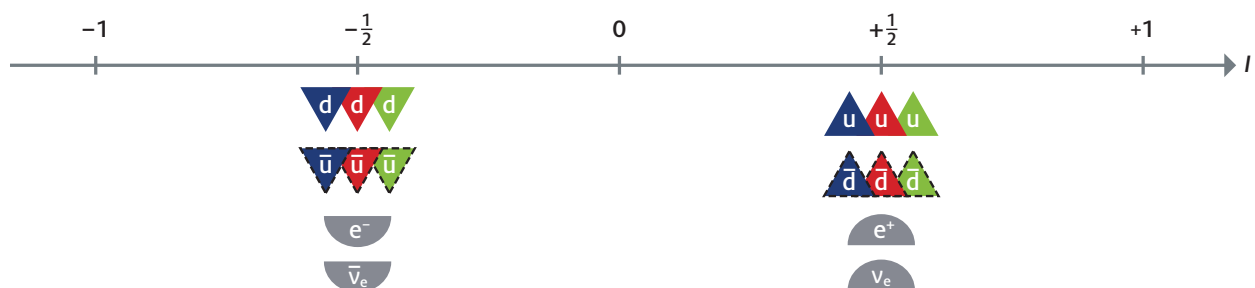


Abb. 16: Die schwachen Ladungszahlen I der Materie- und Anti-Materieteilchen aus Abb. 14. Die Anti-Materieteilchen (Positron, Anti-Up-Quark, Anti-Down-Quark, Anti-Elektron-Neutrino) besitzen Ladungszahlen gleichen Betrags wie ihre zugehörigen Materie-Teilchen, nur mit umgekehrtem Vorzeichen.

¹⁹ Siehe Fachliche Hinweise: Zustandekommen der diskreten Ladungszahlen/-vektoren.

$I = 0$ besitzt, nehmen alle Materieteilchen an der schwachen Wechselwirkung teil. Das ist ein Unterschied im Vergleich zur elektromagnetischen Wechselwirkung, an der die Neutrinos nicht teilnehmen, da sie keine elektrische Ladung besitzen.

Analog zum elektromagnetischen Kopplungsparameter $\alpha_{\text{em}} \approx \frac{1}{137}$ beschreibt der schwache Kopplungsparameter²⁰ $\alpha_{\text{w}} \approx \frac{1}{30}$ die Stärke der schwachen Wechselwirkung, die rund $\frac{137}{30} = 4,5$ -mal stärker ist als die elektromagnetische Wechselwirkung. Die schwache Wechselwirkung erfahren wir im Alltag jedoch nicht, weil sie eine so kurze Reichweite besitzt. Der Name „schwache Wechselwirkung“ stammt aus der kernphysikalischen Sicht der Zeit vor 1980, in der man Wechselwirkungen noch nicht bei Abständen untersuchen konnte, die wesentlich kleiner als die Größe von Nukleonen waren. Mit hochenergetischen Beschleunigern wie dem LHC ist es heute möglich, die tatsächliche Stärke der „schwachen“ Wechselwirkung bei Abständen von bis zu $\frac{1}{1000}$ fm zu erkennen. Die im heutigen Universum stattfindenden Prozesse der schwachen Wechselwirkung z.B. in der Physik von Atomkernen (siehe Tabelle 2) geschehen wegen der sehr kurzen Reichweite dieser Wechselwirkung tatsächlich vergleichsweise selten.

Die schwache Ladungszahl eines zusammengesetzten Systems, wie z.B. eines Protons, ergibt sich aus der Summe der schwachen Ladungszahlen der einzelnen Teilchen. So besitzt beispielsweise das Proton p, welches aus zwei Up-Quarks u und einem Down-Quark d zusammengesetzt ist, die schwache Ladungszahl:

$$I_{\text{p}} = I_{\text{u}} + I_{\text{u}} + I_{\text{d}} = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) = +\frac{1}{2}$$

Entsprechend besitzt ein Neutron die schwache Ladungszahl:

$$I_{\text{n}} = I_{\text{u}} + I_{\text{d}} + I_{\text{d}} = +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2}$$

Das Vorzeichen der schwachen Ladungszahl gibt – genau wie bei der elektrischen Ladungszahl – an,

wie ein schwach geladenes Teilchen mit einem anderen schwach geladenen Teilchen wechselwirkt: Bei gleichem Vorzeichen stoßen sich die Teilchen ab. Bei entgegengesetztem Vorzeichen kann allerdings, im Gegensatz zur elektrischen Ladung, beides, Anziehung oder Abstoßung, vorliegen (siehe Fachlicher Hinweis: Ladungsprodukt). Ein Proton p mit $I_{\text{p}} = +\frac{1}{2}$ kann also ein Anti-Elektron-Neutrino $\bar{\nu}_{\text{e}}$ mit $I_{\bar{\nu}_{\text{e}}} = -\frac{1}{2}$ über die schwache Kraft anziehen, ähnlich wie es wegen $Z_{\text{p}} = +1$ und $Z_{\text{e}^-} = -1$ ein Elektron über die elektromagnetische Kraft anzieht. Allerdings ist die Anziehung durch die schwache Kraft so kurzreichweitig, dass keine gebundenen Zustände entstehen können. Deshalb findet man in der Atomhülle keine Neutrinos, da diese nur der schwachen Kraft und der Gravitationskraft unterliegen. Sie sind immer ungebunden und bewegen sich frei durchs Universum. In Erscheinung tritt die schwache Wechselwirkung dagegen bei Streuungen von Teilchen wie Neutrinos oder bei Teilchenumwandlungen. Beispielsweise kann sich bei der sogenannten β^- -Umwandlung (auch: β^- -Zerfall) aufgrund der schwachen Wechselwirkung ein elektrisch neutrales Neutron in ein elektrisch positiv geladenes Proton umwandeln, wobei ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino entstehen.

Wäre die elektrische Ladungszahl die einzige Ladung, die bei einem Wechselwirkungsprozess bzw. einer Teilchenumwandlung erhalten sein müsste, so wäre es im Prinzip möglich, dass sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt (β^- -Umwandlung des Neutrons, so wie sie zwischen 1920 und 1930 angenommen wurde):



Bei dieser Umwandlung ist die Summe der elektrischen Ladungszahlen der Teilchen vor und nach der Wechselwirkung erhalten:

$$Z_{\text{n}} = Z_{\text{p}} + Z_{\text{e}^-}$$

$$0 = +1 + (-1)$$

$$0 = 0$$

²⁰ Auch für die schwache Wechselwirkung kann man über die Beziehung $\alpha_{\text{w}} = \frac{g_{\text{w}}^2}{4 \cdot \pi}$ eine schwache Kopplungsstärke g_{w} angeben, die ebenfalls die Stärke der schwachen Wechselwirkung beschreibt. Das Produkt $I \cdot g_{\text{w}}$ entspricht dann dem Produkt $Z \cdot e$ bei der elektrischen Ladung. Zur besseren Übersichtlichkeit wird sich aber in diesem Text auf die Kopplungsparameter α_i beschränkt.

Diese Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron $n \rightarrow p + e^-$ findet in der Natur jedoch so nicht statt, obwohl dabei neben der Erhaltung der elektrischen Ladung auch Impuls- und Energieerhaltung problemlos erfüllbar wären! Im Jahre 1930 postulierte Wolfgang Pauli aufgrund von Messungen der Energien der Reaktionsprodukte bei der β^- -Umwandlung, dass dabei zusätzlich ein weiteres elektrisch ungeladenes und sehr schwer nachweisbares Teilchen entstehen muss. Dieses Teilchen taufte Enrico Fermi später „Neutrino“. Heute kennt man auch den theoretischen Grund für die Entstehung dieses Teilchens: Bei der β^- -Umwandlung wäre ohne das zusätzliche Neutrino die Summe der schwachen Ladungszahlen der Teilchen vor und nach der Umwandlung nicht erhalten:

$$\begin{aligned} I_n &\neq I_p + I_{e^-} \\ -\frac{1}{2} &\neq +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) \\ -\frac{1}{2} &\neq 0 \end{aligned}$$

Die β^- -Umwandlung findet demnach so statt, dass sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Neutrino umwandelt:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Da das Anti-Neutrino elektrisch neutral ist, ist die elektrische Ladungserhaltung immer noch erfüllt:

$$\begin{aligned} Z_n &= Z_p + Z_{e^-} + Z_{\bar{\nu}_e} \\ 0 &= +1 + (-1) + 0 \\ 0 &= 0 \end{aligned}$$

Nun ist aber auch die schwache Ladungszahl erhalten, da das entstehende Anti-Neutrino genau die bisher nach dem Zerfall fehlende schwache Ladungszahl $I_{\bar{\nu}_e} = -\frac{1}{2}$ besitzt:

$$\begin{aligned} I_n &= I_p + I_{e^-} + I_{\bar{\nu}_e} \\ -\frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) \\ -\frac{1}{2} &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass in der Natur nur solche Prozesse stattfinden, bei denen sowohl die elektrische als auch die schwache Ladungszahl gleichzeitig erhalten sind. Wie im nächsten Kapitel gezeigt wird, muss bei allen Wechselwirkungen darüber hinaus auch die Summe der Farbladungsvektoren aller bei der Wechselwirkung beteiligten Teilchen erhalten sein.

2.3.3 Die starke Ladung

Die Materieteilchen, die eine starke Ladung (auch: „Farbladung“) besitzen, nennt man Quarks, ihre Anti-Teilchen sind die Anti-Quarks. Das Proton und das Neutron beispielsweise bestehen aus Quarks. Die starke Ladung ist keine Zahl, sondern sie besitzt einen Vektorcharakter. Man bezeichnet die starken Ladungen daher auch als Farbladungsvektoren. Die Farbladungsvektoren sind Vektoren auf einem zweidimensionalen Gitter (auch: Farbgitter). Dieses Farbgitter besitzt drei Achsen²¹, die jeweils einen Winkel von 120° bilden (siehe Abb.17).

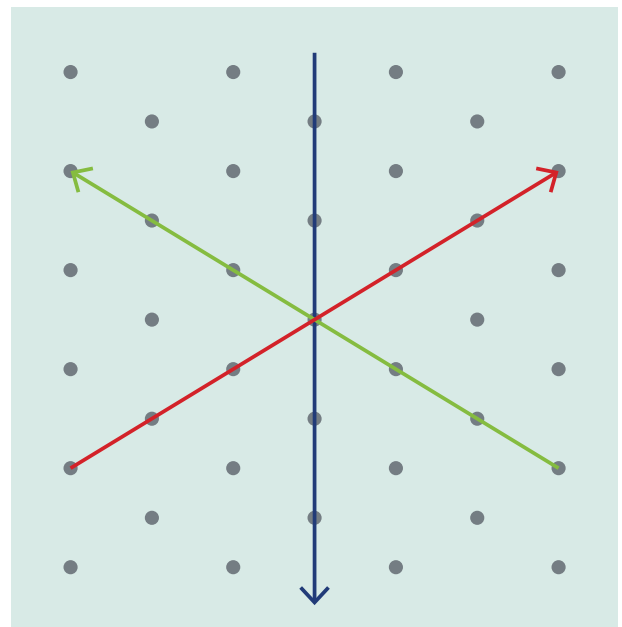


Abb. 17: Das zweidimensionale Farbgitter

²¹ Die Farbachsen entsprechen nicht den Koordinatenachsen des Farbgitters (diese sind in den Abbildungen nicht eingezeichnet), sondern kennzeichnen lediglich die Richtungen der drei unterschiedlichen Farbladungsvektoren.

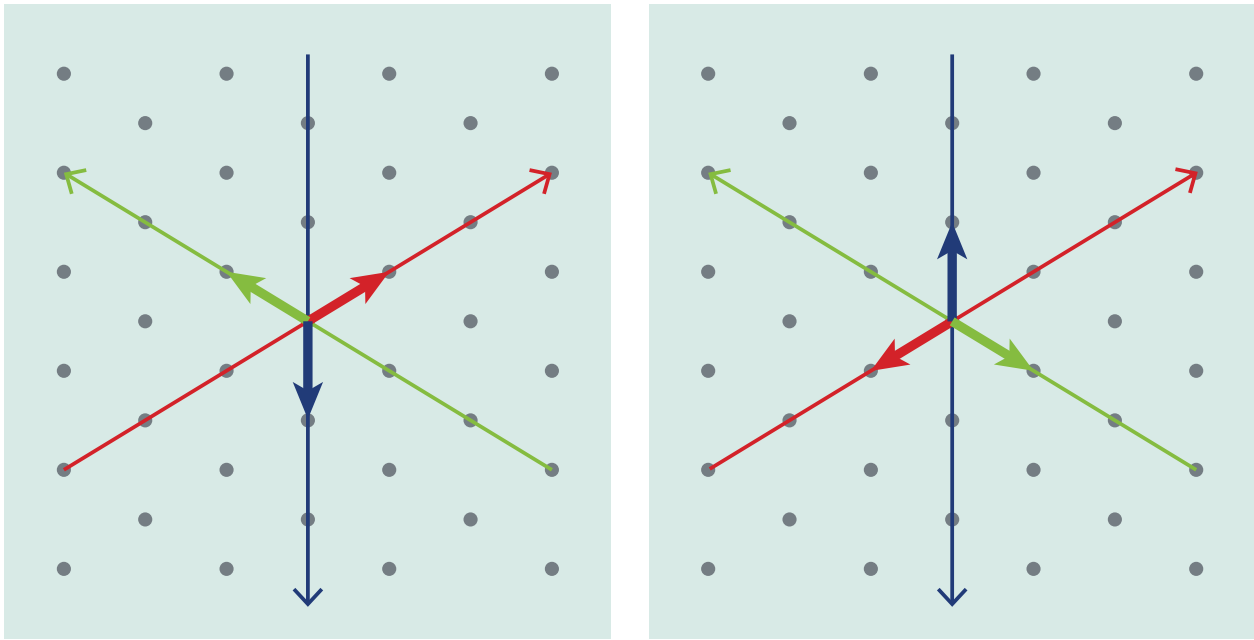


Abb. 18: Die drei Farbladungsvektoren der Quarks auf dem Farbgitter (links) sowie der Anti-Quarks auf dem Farbgitter (rechts)

Die Farbladungsvektoren der Quarks sind Vektoren entlang dieser drei Achsen und haben den Betrag $\sqrt{\frac{1}{3}}$ (siehe Abb. 18 links). Quarks besitzen also jeweils genau einen von drei verschiedenen möglichen Farbladungsvektoren. Gleichartige Quarks (z. B. Up-Quarks) mit unterschiedlichen Farbladungsvektoren sind unterschiedliche Teilchen, da alle Teilchen durch ihre Ladungen charakterisiert werden.

Die drei Farbladungsvektoren werden mit „rot“ (↗), „grün“ (↖) und „blau“ (↓) bezeichnet²². Die Anti-Quarks kommen mit drei verschiedenen Farbladungsvektoren vor, die in Abb. 18 rechts dargestellt sind. Die drei Farbladungsvektoren der Anti-Quarks nennt man auch „anti-rot“ (↘), „anti-grün“ (↙) und „anti-blau“ (↑). Da die Anti-Quarks die Anti-Teilchen der Quarks sind, ergeben sich die Farbladungsvektoren der Anti-Quarks aus den Farbladungsvektoren der Quarks, indem man diese mit -1 multipliziert, d. h. ihre Richtung umkehrt. Die Farbladungsvektoren der Anti-Quarks sind somit die negativen Einheitsvektoren entlang der drei Achsen. Aufgrund ihrer Farbladungsvektoren lassen sich den Quarks und den Anti-Quarks Gitterpunkte auf dem

Farbgitter zuordnen: Die Position eines Anti-/Quarks auf dem Farbgitter entspricht dabei dem Gitterpunkt, zu dem sein Farbladungsvektor zeigt. Dies ist in Abb. 19 exemplarisch für das Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor u^{rot} und das Anti-Up-Quark mit anti-rotem Farbladungsvektor $\bar{u}^{\text{anti-rot}}$ illustriert.

Insgesamt ergibt sich somit für alle Quarks und Anti-Quarks die in Abb. 20 dargestellte Verteilung der ihnen im Farbgitter zugeordneten Gitterpunkte.

Welche Farbladung besitzen aus Quarks zusammengesetzte Teilchen, z. B. die Nukleonen? Obwohl alle Quarks Farbladungen besitzen, ist beispielsweise ein Proton (oder auch ein Neutron) farbladungsneutral, d. h. es besitzt keine resultierende Farbladung. Der Grund dafür ist, dass jedes Quark des Protons eine andere Farbladung besitzt (z. B. $p(u^{\text{rot}} u^{\text{grün}} d^{\text{blau}})$ oder jede andere Kombination²³ aus je einmal rot, einmal grün und einmal blau) und sich somit die Farbladungsvektoren der drei Quarks zum Nullvektor addieren:

$$\vec{C}_u^{\text{rot}} + \vec{C}_u^{\text{grün}} + \vec{C}_d^{\text{blau}} = \text{↗} + \text{↖} + \text{↓} = \text{↘} = \vec{0}$$

²² Die Darstellung der Farbladungsvektoren im Text, in Gleichungen und als Indizes an Teilchensymbolen ist als qualitative Symbolik zu verstehen. Die Winkel sowie Pfeillängen spiegeln die Eigenschaften der Vektoren auf dem Farbgitter quantitativ nicht exakt wider.

²³ Quantenmechanisch ist das Proton sogar eine Überlagerung von allen möglichen solchen Kombinationen, die alle „gleichzeitig vorhanden“ sind.

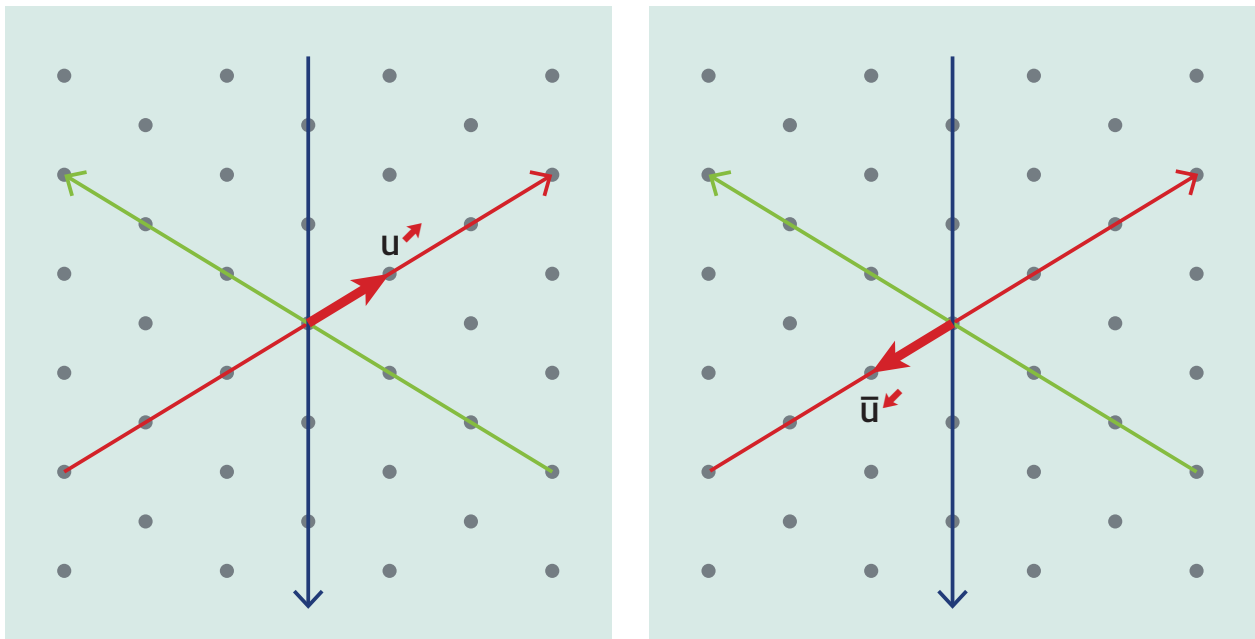


Abb. 19: Zuordnung eines Quarks (links) und eines Anti-Quarks (rechts) zu Gitterpunkten auf dem Farbgitter

An diesem Beispiel wird deutlich, warum die starke Ladung auch als Farbladung bezeichnet wird. Obwohl der Begriff „Farbe“ hier nichts mit den optischen Farben zu tun hat, liefert er eine hilfreiche Vorstellung: Ein rotes, grünes und blaues Quark bilden zusammen ein farbladungsneutrales, also „weißes“ Proton – ebenso wie rot, grün und blau bei der additiven Farbmischung weiß ergeben.

Auch hier, analog zur elektrischen und schwachen Ladung, gehört zur starken Ladung eine entsprechende Wechselwirkung. Stark geladene Teilchen können sich über die sogenannte starke Wechselwirkung anziehen oder abstoßen. Wegen des Vektorcharakters der starken Ladungen und ihres kompliziert auszuwertenden quantenmechanischen Skalarprodukts $\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2$ werden hier nicht alle Möglichkeiten der Anziehung und Abstoßung diskutiert²⁴. Die Anziehung zwischen drei Quarks mit je einem der drei Farbladungsvektoren rot (↗), grün (↘) und blau (↓) bewirkt die Bildung von Protonen und Neutronen. Durch die Anziehung zwischen einem

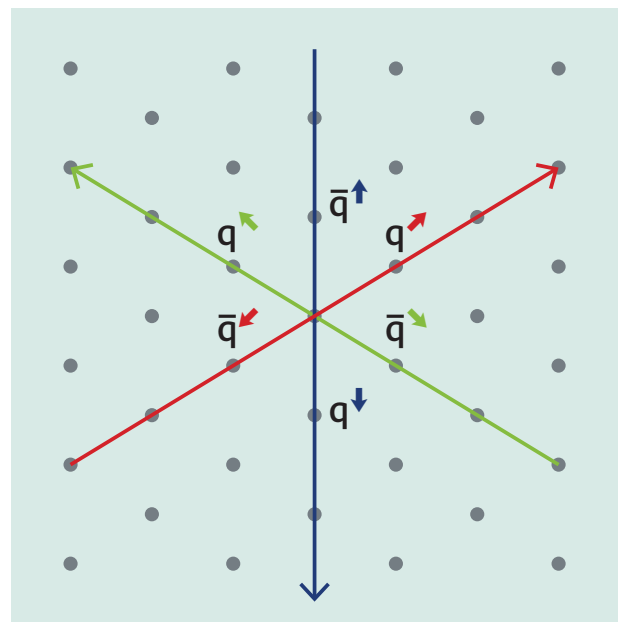


Abb. 20: Gitterpunkte der Quarks q und Anti-Quarks \bar{q} auf dem Farbgitter

²⁴ Ähnlich wie bei der schwachen Ladung (siehe Fachliche Hinweise S. 93) hängt Abstoßung oder Anziehung zweier (Anti-)Quarks davon ab, welche starke Gesamtladung ihre Farbladungsvektoren bilden. Zwei Quarks mit gleichen Farbladungen, z. B. rot (↗) und rot (↗), stoßen sich immer ab. Ein Quark und ein Anti-Quark mit entgegengesetzt orientierten Farbladungsvektoren ziehen sich an, wenn sie – wie im Falle von Mesonen – eine symmetrische quantenmechanische Summe aller möglichen Farb-Anti-Farbladungskombinationen, rot (↗) und anti-rot (↖) + grün (↘) und anti-grün (↙) + blau (↓) und anti-blau (↑), bilden. Andernfalls erfolgt Abstoßung. Quarks und Anti-Quarks mit unterschiedlichen Farbladungs-Anti-Farbladungs-Kombinationen stoßen sich immer ab, z. B. rot (↗) und anti-grün (↙). Bei Wechselwirkung zweier verschiedener Farbladungen, z. B. rot (↗) und grün (↘), ist wiederum beides, Anziehung und Abstoßung, möglich.

INFOKASTEN:

EXPERIMENTELLE ERKENNTNISSE ZU QUARKS UND DER STARKEN LADUNG

Dass die Nukleonen im Atomkern keine elementaren Teilchen sind, sondern eine Substruktur besitzen, wurde experimentell in den Jahren 1969 und 1970 am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) an der Universität in Stanford nachgewiesen. Das Prinzip der dafür benutzten tiefinelastischen Elektronenstreuung ähnelte stark dem Vorgehen von Ernest Rutherford in seinen berühmten Streuexperimenten von 1911. Rutherford löste die Struktur von Atomen auf, indem er diese mit Heliumkernen (Alpha-Teilchen) beschoss und aus dem Streuverhalten dieser Teilchen (insbesondere aus den Streuwinkeln) Rückschlüsse über den Aufbau der Atome zog. Das Ergebnis war die Erkenntnis, dass Atome einen sehr kleinen und schweren elektrisch positiv geladenen Kern besitzen. Bei den Experimenten in Stanford löste man die Struktur von Protonen und Neutronen auf, indem man diese mit hochenergetischen Elektronen beschoss. Analog zum Rutherford-Experiment konnte aus den gemessenen Streuwinkeln abgeleitet werden, dass innerhalb der Nukleonen viel kleinere, im Rahmen der Ortsauflösung punktförmige Streuzentren vorhanden sind: die Quarks. Die bereits 1964 von Zweig und Gell-Mann postulierten elektrischen Ladungszahlen von jeweils drei in den Nukleonen vorhandenen Quarks konnten Anfang der 1970er Jahre aus Vergleichen mit Neutrino-Nukleon Streuung am CERN experimentell bestätigt werden. Für die theoretischen und experimentellen Erkenntnisse zum Aufbau der Nukleonen wurden M. Gell-Mann 1969 und J. I. Friedman, H. W. Kendall und R. E. Taylor 1990 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet²⁵.

Die starke Ladung hat im Gegensatz zur elektrischen und zur schwachen Ladung Vektorcharakter. Experimentell wurde bestätigt, dass die starke Ladung aller Quarks betragsmäßig gleich groß sein muss, denn diese unterliegen alle in gleichem Maße der starken Wechselwirkung. Aus den Experimenten am SLAC und am CERN (siehe oben) ist bekannt, dass Nukleonen aus drei Quarks bestehen. Außerdem sind die Nukleonen insgesamt farbladungsneutral. In der Summe müssen sich die Farbladungen der drei Quarks eines Nukleons also aufheben. Da drei betragsmäßig gleich große Zahlen in der Summe niemals Null ergeben können, kann es sich bei der starken Ladung nicht um eine skalare Größe handeln. Die Summe dreier betragsmäßig gleich großer Vektoren kann allerdings durchaus den Nullvektor ergeben, weshalb die starke Ladung vektoriellen Charakter haben muss, wie 1973 von der Theorie der starken Wechselwirkung (Quanten-Chromodynamik, QCD) vorhergesagt.

Dass Quarks mit genau drei unterschiedlichen Farbladungsvektoren existieren, ist ebenfalls eine direkte Folge der QCD-Theorie, wurde allerdings wie folgt auch experimentell überprüft und bestätigt. Aus der Kenntnis der schwachen und der elektrischen Ladung jedes Quarks lässt sich berechnen, wie häufig es bei Teilchenumwandlungen entstehen muss. Experimentell hat man festgestellt (z. B. bei der Untersuchung von Umwandlungen des W-Teilchens), dass jedes Quark (also u, d, s usw.) genau dreimal so häufig entsteht wie berechnet. Aus dieser Beobachtung zieht man den Schluss, dass drei Varianten jedes Quarks und jedes Anti-Quarks existieren, von denen jedes einzelne mit der vorhergesagten Häufigkeit entsteht. Diese unterscheiden sich ausschließlich in den Farbladungsvektoren, von denen es also ebenfalls drei verschiedene geben muss.

²⁵ Weitere Ausführungen zu den Streuexperimenten mit Elektronen an Nukleonen sowie ihrer historischen Bedeutung sind z. B. unter www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1990/presentation-speech.html in der Laudatio der Nobelpreisverleihung 1990 sowie im Artikel „The Discovery of Quarks“ unter <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-5724.pdf> zu finden.

Quark einer Farbladung und einem Anti-Quark mit der zugehörigen Anti-Farbladung (z. B. rot (↗) und anti-rot (↖) entstehen gebundene Systeme, die man „Mesonen“ nennt und die durch die starke Kraft auf Bindungsradien von ca. 1 fm zusammengehalten werden. Sie haben ganz ähnliche Eigenschaften wie das Wasserstoffatom, mit dem Unterschied, dass dort Proton und Elektron aufgrund der Coulombkraft aneinander gebunden werden, und der Bindungsradius mit ca. 50.000 fm viel größer ist (Abb. 21).

Wie lassen sich nun Wechselwirkungen im Hinblick auf die starke Ladung verstehen? Ein Proton p ($u^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\downarrow}$) und ein Neutron n ($d^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\uparrow}$) können miteinander in Wechselwirkung treten, indem beispielsweise das Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor des Protons ($u^{\uparrow\uparrow}$) mit dem Down-Quark mit blauem Farbladungsvektor des Neutrons ($d^{\downarrow\downarrow}$) ausgetauscht wird (Quarkpaarbindung, siehe Kapitel 2.2.3). Durch diesen Austausch würde rein formal zunächst das Proton ($u^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\downarrow}$) in ein Neutron ($d^{\downarrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow}$) umgewandelt, und das Neutron ($d^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\uparrow}$) in ein Proton ($u^{\uparrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow}$) umgewandelt:

$$p(u^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\downarrow}) + n(d^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\uparrow}) \rightarrow n(d^{\downarrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow}) + p(u^{\uparrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow})$$

Die bei diesem Austausch entstehenden Neutronen und Protonen wären jedoch nicht farbladungsneutral, denn sie wären nicht aus drei Quarks mit verschiedenen Farbladungsvektoren zusammengesetzt. Damit farbladungsneutrale Neutronen und Protonen entstehen, muss das Up-Quark $u^{\uparrow\uparrow}$ aus dem Proton in ein Up-Quark $u^{\downarrow\downarrow}$ und das Down-Quark $d^{\downarrow\downarrow}$ aus dem Neutron in ein Down-Quark $d^{\uparrow\uparrow}$ umgewandelt werden:

$$u^{\uparrow\uparrow} + d^{\downarrow\downarrow} \rightarrow u^{\downarrow\downarrow} + d^{\uparrow\uparrow}$$

Solche Umwandlungen von Quarks unter Änderung der Farbladungsvektoren sind nur aufgrund der starken Wechselwirkung möglich. Bei diesem Prozess ist die Summe der Farbladungsvektoren \vec{C} erhalten, denn es gilt:

$$\vec{C}_{u^{\uparrow\uparrow}} + \vec{C}_{d^{\downarrow\downarrow}} = \vec{C}_{u^{\downarrow\downarrow}} + \vec{C}_{d^{\uparrow\uparrow}}$$

$$\uparrow\uparrow + \downarrow\downarrow = \downarrow\downarrow + \uparrow\uparrow$$

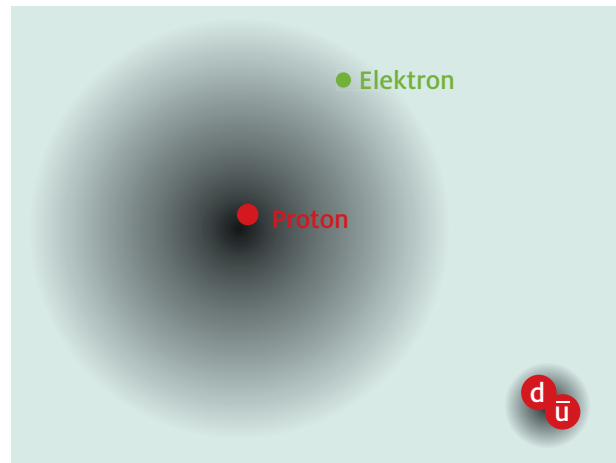


Abb. 21: Analogie zwischen dem Wasserstoffatom aus Proton und Elektron und einem Meson aus einem Down-Quark und Anti-Up-Quark. Das Meson ist 50.000 Mal kleiner als das Wasserstoffatom und hier stark vergrößert dargestellt. Es ist ungefähr so groß wie das Proton im Wasserstoffatom, das aber ebenfalls über 1000-fach vergrößert dargestellt ist.

Durch diese Umwandlungen entstehen nun farbladungsneutrale Neutronen und Protonen:

$$p(u^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\downarrow}) + n(d^{\downarrow\downarrow} d^{\uparrow\uparrow} u^{\downarrow\uparrow}) \rightarrow n(d^{\downarrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow}) + p(u^{\uparrow\uparrow} d^{\uparrow\downarrow} u^{\downarrow\uparrow})$$

Somit lässt sich festhalten, dass Nukleonen (Protonen und Neutronen) stets so aus Quarks zusammengesetzt sind, dass sich die Farbladungsvektoren aller im Nukleon befindlichen Quarks zum Nullvektor summieren. Gleiches gilt auch für alle anderen aus Quarks zusammengesetzten Teilchen.

Bei der Quarkpaarbindung zwischen Proton und Neutron müssen sich die ausgetauschten Quarks in der Regel in gleichartige Quarks anderer Farbladungen umwandeln. Diese Umwandlungen sind aufgrund der starken Wechselwirkung möglich und geschehen immer so, dass die Summe der Farbladungsvektoren aller Teilchen vor dem Wechselwirkungsprozess gleich der Summe der Farbladungsvektoren aller Teilchen nach dem Wechselwirkungsprozess ist (Farbladungserhaltung).

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Bei jeder Wechselwirkung sind alle drei Ladungsarten Erhaltungsgrößen. Die Summe der elektrischen Ladungszahlen ändert sich demnach bei einer Wechselwirkung nicht. Gleiches gilt für die Summe der schwachen Ladungszahlen sowie für die Summe der Farbladungsvektoren.

Mathematisch bedeutet dies: Es gelten gleichzeitig die folgenden Gleichungen, wobei die Zahlen im Index die Teilchen im Anfangszustand und die entsprechenden Zahlen mit Strich (') die Teilchen im Endzustand bezeichnen:















1. Generation	I	Z	\vec{C}
elektrisch neutrale Leptonen 	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen 	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	  	$+\frac{1}{2}$ $+\frac{2}{3}$	blau  rot  grün 
	  	$-\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{3}$	blau  rot  grün 
starke Wechselwirkung			
elektromagnetische Wechselwirkung			
schwache Wechselwirkung			

Abb. 22:
Die Ladungen der Materieteilchen der ersten Generation















1. Generation	I	Z	\vec{C}
schwache Wechselwirkung			
elektromagnetische Wechselwirkung			
starke Wechselwirkung			
Quarks	  	$+\frac{1}{2}$ $+\frac{1}{3}$	anti-blau  anti-rot  anti-grün 
	  	$-\frac{1}{2}$ $-\frac{2}{3}$	anti-blau  anti-rot  anti-grün 
elektrisch geladene Leptonen 	$+\frac{1}{2}$	+1	farblos $\vec{0}$
elektrisch neutrale Leptonen 	$-\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$

Abb. 23:
Die Ladungen der Anti-Materieteilchen der ersten Generation. Im Bild sind Anti-Farben durch einen gestrichelten schwarzen Rand der Anti-Quark-Symbole gekennzeichnet.

$$Z_1 + Z_2 + \dots = Z_{1'} + Z_{2'} + \dots$$

$$I_1 + I_2 + \dots = I_{1'} + I_{2'} + \dots$$

$$\vec{C}_1 + \vec{C}_2 + \dots = \vec{C}_{1'} + \vec{C}_{2'} + \dots$$

mit Z : elektrische Ladungszahl, I : schwache Ladungszahl und \vec{C} : Farbladungsvektor.

2.3.4 Zusammenfassung: Die Ladungen der elementaren Anti-/Materieteilchen

Die Elementarteilchen, aus der die uns umgebende Materie besteht, sind die drei Up-Quarks, die drei Down-Quarks, das Elektron und das Elektron-Neutrino (wobei letzteres nur ungebunden existiert und kein Bestandteil der atomaren Materie ist). Man nennt diese „Teilchen der ersten Generation“. Wie in den Kapiteln 2.3.1 - 2.3.3 dargelegt wurde, gibt es in der Natur drei verschiedene Ladungsarten, die ein Teilchen besitzen kann: die elektrische Ladung, die schwache Ladung und die starke Ladung (Farbladung). Die Ladungen der drei Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos sind in Abb. 22 dargestellt:

Die Kästen in verschiedenen Türkisstufen fassen Teilchen zusammen, die starke Farbladungen (hell), elektrische Ladungen (mittel) und schwache Ladungen (dunkel) besitzen und daher an den jeweiligen Wechselwirkungen teilnehmen. Alle Teilchen besitzen eine schwache Ladung. Bis auf das Elektron-Neutrino besitzen auch alle Teilchen eine elektrische Ladung. Eine starke Ladung hingegen besitzen ausschließlich die Quarks.

Zu jedem Materieteilchen existiert ein zugehöriges Anti-Materieteilchen. Ein Anti-Materieteilchen unterscheidet sich von seinem zugehörigen Materieteilchen ausschließlich darin, dass alle seine Ladungszahlen das entgegengesetzte Vorzeichen haben, bzw. sein Farbladungsvektor die entgegengesetzte Richtung besitzt. Die Ladungen der Anti-Materieteilchen der ersten Generation sind in Abb. 23 dargestellt²⁶.

2.4 DIE VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN

In Kapitel 2.2 wurden die vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik eingeführt. Diese Wechselwirkungen beschreiben eine Fernwirkung zwischen Körpern. Nur dann, wenn die Körper eine Ladung (elektrische Ladung, schwache Ladung, starke Farbladung) bzw. (im Fall der gravitativen Wechselwirkung) Masse besitzen, die zu einer der vier Wechselwirkungen gehört, unterliegen sie den entsprechenden Wechselwirkungen. In der klassischen Physik werden die Fernwirkungen der elektromagnetischen Wechselwirkung und der gravitativen Wechselwirkung jeweils durch Felder (elektrische und magnetische Felder, die durch elektrische Ladungen oder Ströme hervorgerufen werden, bzw. Gravitationsfelder, die durch Massen hervorgerufen werden) beschrieben. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde entdeckt, dass die elektromagnetische Wechselwirkung auf quantenphysikalischer Ebene durch Teilchen, die Photonen (auch: Lichtteilchen), vermittelt wird. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde zudem herausgefunden, dass auch die starke und schwache Wechselwirkung jeweils durch Teilchen vermittelt werden. Die Teilchen, über die eine Wechselwirkung vermittelt wird, werden Botenteilchen (auch: Austauschteilchen) genannt.

In den folgenden Kapiteln wird der klassische Feldbegriff wiederholt und die Botenteilchen der elektromagnetischen, starken und schwachen Wechselwirkung vorgestellt. Dabei werden folgende Fragen diskutiert: Was ist die Beziehung zwischen Feldbegriff und Botenteilchen? Wie kann man damit verstehen, dass die Beträge aller Kräfte bei ganz kleinen Abständen eine $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit besitzen, manche Kräfte aber bei größeren Abständen davon abweichen? Wann ist es sinnvoll, den Feldbegriff durch Botenteilchen zu ersetzen? Wie lassen sich Wechselwirkungsprozesse mit Botenteilchen darstellen und welche Eigenschaften haben diese Botenteilchen?

²⁶ Die Materie-Teilchen in Abb. 22 und die Anti-Materieteilchen in Abb. 23 sind paarweise bezüglich der schwachen Ladung so gruppiert, dass jeweils ein Teilchen mit $I = +\frac{1}{2}$ oberhalb eines ihm zugeordneten Teilchens mit $I = -\frac{1}{2}$ angeordnet ist. Diese sogenannten Dupletts werden in Kapitel 2.4.3 ausführlicher diskutiert.

2.4.1 Felder und Botenteilchen

Die Fernwirkungen der Gravitationskraft sowie der magnetischen und elektrischen Kraft werden in der klassischen Physik durch Felder beschrieben. Beispielsweise ist die Kraft auf ein elektrisch geladenes Teilchen mit der Ladung Q in einem elektrischen Feld der Feldstärke \vec{E} gegeben durch:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

Elektrische Felder lassen sich durch Feldlinien beschreiben. Diese erstrecken sich bis ins Unendliche, was bedeutet, dass die elektrische Kraft eine unendliche Reichweite besitzt. Den Verlauf der Feldlinien kann man mit einem sogenannten „Probeteilchen“ vermessen, das selbst eine positive elektrische Ladung besitzt. Die Richtung einer Feldlinie gibt die Richtung der Kraft auf solch ein Probeteilchen an. Der Betrag der Kraft ist durch die Dichte der Feldlinien gegeben.

Abb. 24 zeigt das Feldlinienbild des elektrischen Feldes, welches durch ein Teilchen mit elektrischer Ladung hervorgerufen wird. Die Äquipotenziallinien (im dreidimensionalen Raum eigentlich –flächen) haben die Form konzentrischer Kreise (bzw. Kugelflächen). Einige davon sind türkis gestrichelt eingezeichnet. Auf ein elektrisch geladenes Teilchen wirkt eine Kraft in Richtung der Feldlinien. Ob es sich um eine anziehende oder abstoßende Kraft handelt, ist abhängig vom Vorzeichen der elektrischen Ladung des sich im Feld befindenden Teilchens und des Teilchens, welches das elektrische Feld erzeugt. Besitzen die elektrischen Ladungen beider Teilchen dasselbe Vorzeichen, ist die Kraft abstoßend, bei unterschiedlichen Vorzeichen hingegen anziehend. Es ist zu erkennen, dass die Dichte der Feldlinien und somit die hervorgerufene Kraft umso kleiner ist, je größer der Abstand zu dem Teilchen ist, welches das Feld verursacht.

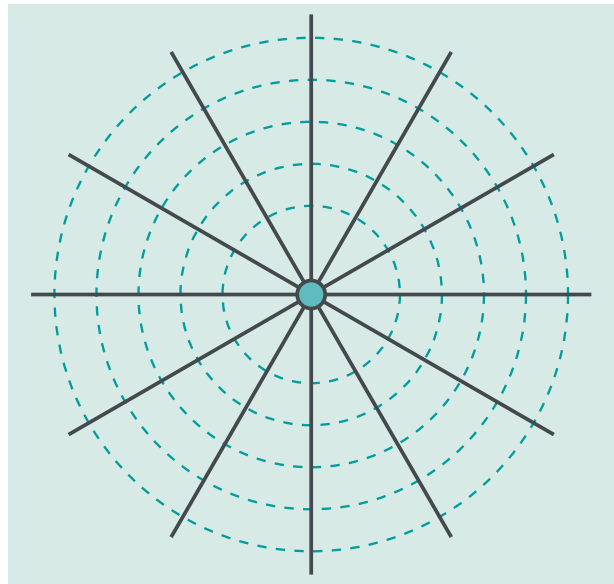


Abb. 24: Feldlinien des elektrischen Feldes eines elektrisch geladenen Teilchens

Aus Abb. 24 kann man jedoch nicht nur die qualitative Abhängigkeit der Kraft ablesen, sondern durch rein geometrische Betrachtungen auch deren genaue Abstands-Abhängigkeit ermitteln. Dazu umgibt man das Teilchen, welches das Feld erzeugt, in Gedanken durch eine Kugel mit dem Radius r . Da sich die Feldlinien bis ins Unendliche erstrecken und niemals kreuzen, müssen alle Feldlinien, die ihren Ursprung innerhalb der Kugel haben, durch die Kugeloberfläche hindurchtreten. Aus diesem Grund muss die Anzahl der Feldlinien, die durch die Kugeloberfläche hindurchtritt, konstant bleiben, wenn man den Radius der Kugel vergrößert. Da der Oberflächeninhalt einer Kugel mit dem Radius r durch

$$A_{\text{Kugel}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

gegeben ist, muss die Dichte der elektrischen Feldlinien und damit der Betrag der elektrischen Feldkraft umgekehrt proportional zu A_{Kugel} sein, d. h.

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \sim \frac{1}{A_{\text{Kugel}}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Diese Abstands-Abhängigkeit von $\frac{1}{r^2}$ für beliebig große Werte von r gilt ausschließlich für Wechselwirkungen mit einer unendlichen Reichweite wie die elektromagnetische Wechselwirkung oder auch die gravitative Wechselwirkung, jedoch nicht für Wechselwirkungen mit einer begrenzten Reichweite wie die schwache und die starke Wechselwirkung (vergleiche Kapitel 2.2).

Mit der Entwicklung der Quantenphysik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde entdeckt, dass die Feldenergie nicht kontinuierlich ist, sondern in kleinsten Portionen, den sogenannten Feldquanten, auftritt. Die Quanten des elektrischen Feldes heißen Photonen und wurden 1905 von Albert Einstein postuliert, der damit ein von Max Planck gefundenes Gesetz für elektromagnetische Wärmestrahlung erklärte. Sind viele Quanten beteiligt, so ist eine Beschreibung mit Feldern vorteilhaft: Bei einer SMS werden beispielsweise pro Sekunde 10^{24} Photonen zu einer Mobilfunkantenne und zurück gesendet. Einfacher, als die Bewegung jedes dieser Photonen auszurechnen, lässt sich dieser Vorgang als elektromagnetische Welle aus elektrischen und magnetischen Feldern beschreiben. Bei hochenergetischen elektromagnetischen Wechselwirkungsprozessen der Teilchenphysik, wie kurzzeitiger Streuung zweier Teilchen aneinander, sind dagegen nur wenige Photonen - oft dominant nur ein einziges Photon - beteiligt, so dass eine Beschreibung mit einzelnen Feldquanten wesentlich geeigneter ist.

Wird eine Kraft durch Feldquanten vermittelt, die unterwegs weder entstehen noch verschwinden (unendliche Reichweite), so nimmt deren Dichte durch eine gedachte Kugeloberfläche genauso mit $\frac{1}{r^2}$ ab, wie es die Feldlinien in Abb. 24 tun. So ist die Beschreibung der Abstandsabhängigkeit der elektromagnetischen Wechselwirkung durch ein elektrisches Feld äquivalent zur Beschreibung durch den Austausch von Photonen.

2.4.2 Elektromagnetische Wechselwirkung: Photon

Auf der (mikroskopischen) Ebene der Elementarteilchen wird die elektrische und magnetische Kraft durch ein masseloses Elementarteilchen vermittelt, das Photon γ . Im Falle einer abstoßenden Kraft kann man sich diesen Prozess analog zu der in Abb. 25 dargestellten Situation vorstellen, bei der sich zwei Personen auf je einem Boot einen Ball zuwerfen, wodurch sich aufgrund der Impulserhaltung die zwei Boote voneinander wegbewegen. Umgekehrt würden sich die beiden Boote aufeinander zubewegen (Anziehung), wenn die Personen einander den Rücken zukehrten und sich einen Bumerang zuwerfen würden (Abb. 26)

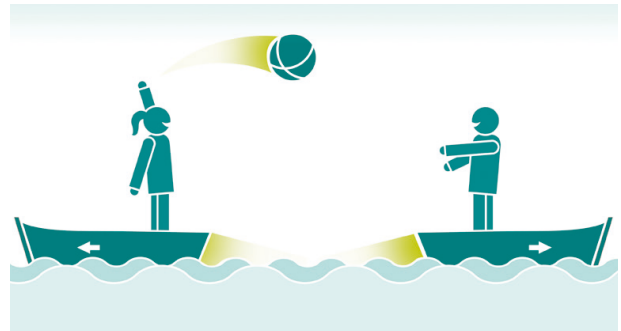


Abb. 25: Abstoßende Wechselwirkung zweier Personen auf je einem Boot durch den Austausch eines Balls

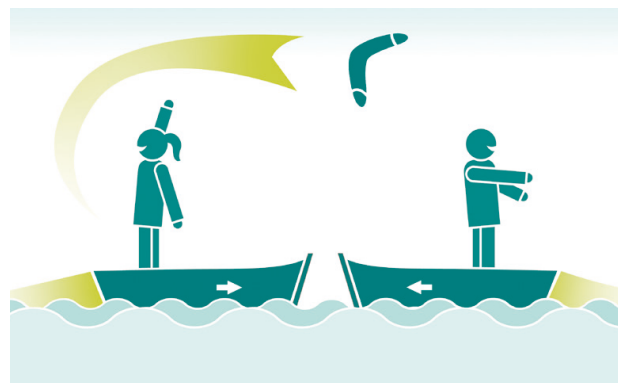


Abb. 26: Anziehende Wechselwirkung zweier Personen auf je einem Boot durch den Austausch eines Bumerangs

INFOKASTEN:

ANALOGIE DER VERMITTLUNG EINER ANZIEHENDEN BZW. ABSTOSSENDEN WECHSELWIRKUNG ÜBER DIE EMISSION UND ABSORPTION EINES TEILCHENS

Die in Abb. 25 und 26 dargestellte Analogie zur Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen zwei elektrisch geladenen Teilchen über das Zuwerfen eines Körpers zwischen zwei Personen ist nicht so zu verstehen, dass ein Photon (oder allgemein: Botenteilchen) ausgetauscht wird, welches ein Teilchen vorher besaß und an das andere Teilchen übergibt. Vielmehr wird bei der elektromagnetischen Wechselwirkung von einem der Teilchen ein Photon erzeugt, welches zum anderen Teilchen übermittelt und von diesem vollständig absorbiert wird. Diese Art der Vermittlung wird auch als Austausch bezeichnet.

Wie bei allen Versuchen, klassische Analogien und Bilder für Prozesse zu finden, die eigentlich mithilfe von Quantentheorien beschrieben werden müssen, ist dieser Vergleich nicht hundertprozentig korrekt. Insbesondere werden Anziehung und Abstoßung nicht durch unterschiedliche Botenteilchen hervorgerufen, wie die Bilder vermuten lassen könnten. Eine fachlich exakte Darstellung teilchenphysikalischer Wechselwirkungen einschließlich Teilchenerzeugung, -vernichtung und -umwandlung wird in Kapitel 2.5 eingeführt und erläutert.

Das Photon ist ebenfalls ein Elementarteilchen und ist daher durch seine Masse ($m_\gamma = 0$) und seine Ladungen eindeutig charakterisiert: Es besitzt weder eine elektrische, noch eine schwache oder starke Ladung, d. h. $Z_\gamma = 0$, $I_\gamma = 0$ und $\vec{C}_\gamma = \vec{0}$. Da es keinerlei Ladung besitzt, unterliegt es selbst keiner der fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, bewirkt die elektromagnetische Wechselwirkung jedoch nicht nur eine Abstoßung oder Anziehung elektrisch geladener Teilchen. Über die elektromagnetische Wechselwirkung können auch Teilchen erzeugt oder vernichtet werden.

Beispielsweise kann sich in der Nähe eines Atomkerns A aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung ein Photon in ein Elektron und ein Positron umwandeln:



Ein solcher Prozess ist in einer Blasenkammeraufnahme in Abb. 27 dargestellt.

Man erkennt deutlich zwei gekrümmte, grün hervorgehobene Spuren, die etwa in der Bildmitte beginnen und zunächst zum oberen Bildrand hin verlaufen. Die V-förmige Spur wird von einem Elektron-Positron-Paar verursacht, das in der Bildmitte erzeugt wurde und sich durch die Blasenkammer bewegt. Das Photon hinterlässt keine Spur, weil es elektrisch ungeladen ist. Da die Blasenkammer von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt ist und das Positron und das Elektron jeweils elektrische Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens besitzen, sind die Spuren des Elektrons und Positrons in entgegengesetzte Richtungen gekrümmt.

Da bei dem in Abb. 27 dargestellten Prozess ein Elektron-Positron-Paar entstanden ist, nennt man diesen Umwandlungsprozess auch „Paarerzeugung“. Das Paar besteht aus einem Teilchen und seinem Anti-Teilchen. Der umgekehrte Prozess, bei dem sich also ein Elektron-Positron-Paar in zwei Photonen umwandelt,

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

nennt man „Paarvernichtung“. Die Paarvernichtung eines Elektron-Positron-Paares in zwei Photonen macht man sich in der Praxis beispielsweise bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) zunutze (siehe Kapitel 2.3.1, Abb.15).

2.4.3 Schwache Wechselwirkung: W^+ , W^- und Z-Teilchen

Die Kräfte zwischen zwei Teilchen aufgrund der elektromagnetischen und der gravitativen Wechselwirkung sind umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Teilchen. Dies sieht man in Abb. 28 (doppelt-logarithmische Skalierung) daran, dass eine Änderung des Abstandes um den Faktor 10 (ein Teilstrich auf der Abszisse) einer Änderung der Kraft um den Faktor $10^2 = 100$ (zwei Teilstriche auf der Ordinate) entspricht.

Die schwache Wechselwirkung besitzt nur eine sehr kurze Reichweite von $\lambda_w = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m} = 0,002 \text{ fm}$. Bei Teilchen, die sich in einem größeren Abstand zueinander befinden, fällt die Kraft der schwachen Wechselwirkung exponentiell ($\sim e^{-\frac{r}{\lambda_w}}$), also wesentlich schneller als quadratisch mit dem Abstand ab (siehe Abb. 28). Ab einem Abstand von 0,2 fm wird die schwache Kraft sogar bereits kleiner als die Gravitationskraft und ist damit längst nicht mehr nachweisbar.

Der plötzliche Abfall der schwachen Kraft lässt sich nicht mehr mit Feldlinien beschreiben, die sich bis ins Unendliche erstrecken, denn aus solchen Feldlinien ergäbe sich zwangsläufig eine $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben. Ein Ausweg wäre eine Beschreibung durch Feldlinien, die sich nicht bis ins Unendliche erstrecken und stattdessen in einem Abstand von ca. $10^{-18} - 10^{-16} \text{ m}$ vom betrachteten Teilchen eine nach der anderen verschwinden (oder auf anderen schwachen Ladungen enden). Das plötzliche Verschwinden der Feldlinien, wie es in Abb. 29 dargestellt ist, steht im Widerspruch zum klassischen Feldlinienmodell,



Abb. 27: Blasenkammeraufnahme zur Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares durch die Umwandlung von einem Photon in der Nähe eines Atomkerns

(Quelle: CERN and High School Teachers Programme at CERN, <http://hst-archive.web.cern.ch/archiv/HST2002/Bubblech/mbitu/electromag-events1.htm>)

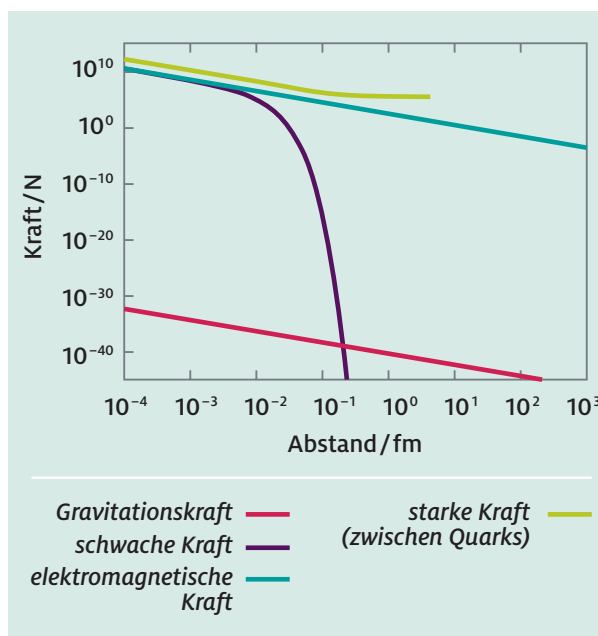


Abb. 28: Kraft zwischen zwei Teilchen als Funktion ihres Abstandes (doppelt-logarithmische Skalierung). Die Kräfte zwischen zwei Teilchen aufgrund der elektromagnetischen und der gravitativen Wechselwirkung sind umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Teilchen. Die Kraft aufgrund der schwachen Wechselwirkung geht ab einem Abstand von 0,002 fm sehr schnell gegen Null. Die Konstanz der starken Kraft ab ca. 1 fm führt dazu, dass auch sie nur eine begrenzte Reichweite besitzt, bevor aus der in die Trennung gesteckte Energie neue Quark-Anti-Quark-Paare entstehen. Jenseits von ca. 2 fm wirken nur noch die elektromagnetische Kraft und die Gravitationskraft, die wir beide im Alltag erfahren.

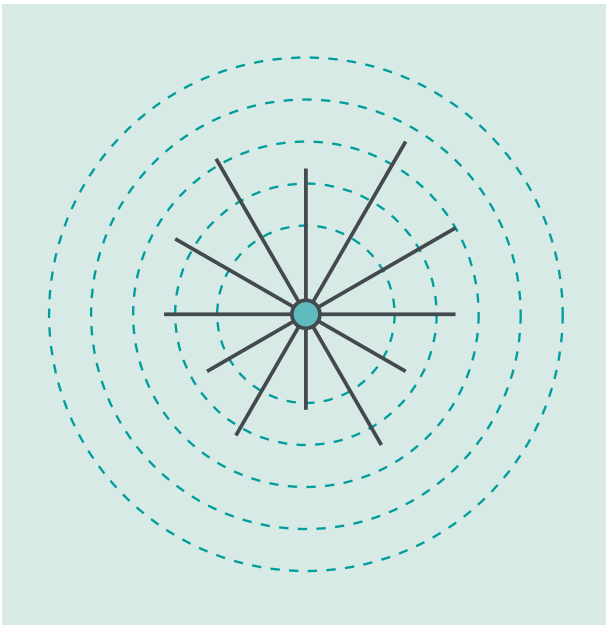


Abb. 29: Visualisierung der endlichen Reichweite der schwachen Wechselwirkung im Feldlinienmodell

welches daher zur Beschreibung der schwachen Wechselwirkung (und auch der starken Wechselwirkung, siehe unten) nicht ohne weiteres geeignet ist.

Eine elegantere Beschreibung, die sich auf natürliche Weise in das Konzept des Austauschs von Botenteilchen zur Vermittlung einer Wechselwirkung einfügt, ist eine Beschreibung durch massebehaftete Botenteilchen (Botenteilchen mit $m > 0$). Man kann aus der Quantenmechanik herleiten, dass Botenteilchen der Masse m eine begrenzte (mittlere) Reichweite von $\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{m \cdot c^2}$ besitzen²⁷. Dabei ist \hbar das reduzierte Planck'sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. Photonen mit $m_\gamma = 0$ haben daher eine unendliche Reichweite $\lambda_\gamma = \infty$. Verwendet man zur Beschreibung der schwachen Wechselwirkung dagegen massebehaftete Botenteilchen, die eine Masse von ca. $100 = \frac{\text{GeV}}{c^2}$ besitzen, ergibt sich die in Abb. 28 dargestellte und experimentell bestätigte Abstandsabhängigkeit der schwachen Kraft zwischen zwei schwach geladenen Teilchen.

Besäßen die Botenteilchen eine Masse, die sehr viel größer als $100 = \frac{\text{GeV}}{c^2}$ wäre, begänne der steile Abfall der schwachen Kraft bereits bei wesentlich kleineren Abständen als 0,002 fm. Besäßen die Botenteilchen hingegen eine Masse, die sehr viel kleiner als $100 = \frac{\text{GeV}}{c^2}$ wäre, so würde die schwache Kraft noch über Abstände von 0,002 fm hinaus genau wie die Coulombkraft mit $\frac{1}{r^2}$ abfallen. Aufgrund der gemessenen Reichweite der schwachen Wechselwirkung müssen die Botenteilchen daher eine Masse von ca. $100 = \frac{\text{GeV}}{c^2}$ besitzen.

Die schwache Wechselwirkung wird durch drei verschiedene, massebehaftete Botenteilchen vermittelt, das W^+ , das W^- und das Z -Teilchen. Im Jahr 1983 gelang es zwei verschiedenen Experimenten am CERN erstmals, diese drei Botenteilchen nachzuweisen und ihre Massen genau zu bestimmen. Carlo Rubbia und Simon van der Meer erhielten für diesen Nachweis 1984 den Nobelpreis für Physik²⁸. Die nachgewiesenen W^+ , W^- und Z -Teilchen besitzen die Massen

$$m_{W^+} = m_{W^-} = 80,4 \frac{\text{GeV}}{c^2} \text{ und } m_Z = 91,2 \frac{\text{GeV}}{c^2}.$$

Die Reichweite von W -Teilchen beträgt demnach

$$\lambda_W = \frac{\hbar \cdot c}{m_W \cdot c^2} = \frac{0,197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}}{80,4 \text{ GeV}} \approx 0,002 \text{ fm}$$

also $\frac{1}{400}$ des Protonradius, der ca. 0,8 fm beträgt. Die Z -Teilchen mit einer Masse von $m_Z = 91,2 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ besitzen annähernd die gleiche Reichweite,

$$\lambda_Z = \frac{\hbar \cdot c}{m_Z \cdot c^2} \approx 0,002 \text{ fm}.$$

Ein besonderes Merkmal der schwachen Wechselwirkung ist offenbar, dass es drei verschiedene Botenteilchen gibt. Im Gegensatz dazu existiert zur elektromagnetischen Wechselwirkung nur ein einziges Botenteilchen, das Photon. Ein weiteres Charakteristikum der schwachen Wechselwirkung ist, dass die W^+ - und W^- -Botenteilchen, im Gegensatz zum Photon, sowohl elektrisch als auch schwach geladen sind: Das W^+ ist einfach elektrisch positiv geladen ($Z_{W^+} = +1$), das W^- ist einfach elek-

²⁷ Siehe Fachliche Hinweise: Endliche Reichweite von massebehafteten Botenteilchen.

²⁸ Weitere Informationen zur Entdeckung der Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung findet man unter anderem unter www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/presentation-speech.html.

trisch negativ geladen ($Z_{W^-} = -1$). Das Z ist elektrisch neutral. Darüber hinaus besitzen das W^+ , Z - und W^- -Teilchen die schwachen Ladungszahlen von $I_{W^+} = +1$, $I_Z = 0$ und $I_{W^-} = -1$.

Da das W^+ und W^- entgegengesetzte elektrische und schwache Ladungszahlen sowie eine identische Masse besitzen, ist das W^- das Anti-Teilchen des W^+ , und umgekehrt.

Über die schwache Wechselwirkung können sich Anti-/Teilchen ineinander umwandeln. Dies geschieht durch die Emission (auch: Abstrahlung) bzw. die Absorption (auch: Einfang) eines W -Teilchens (W^+ oder W^-). Teilchenumwandlungen bilden den Schlüssel, um zu verstehen, wie Ladungen zur Ordnung der Elementarteilchen beitragen. Die Erfahrung zeigt, dass bei Umwandlungen über die schwache Wechselwirkung immer nur ganz bestimmte Paare von Teilchen beteiligt sind. Derartige Teilchenpaare werden als Dupletts bezüglich der schwachen Ladung bzw. der schwachen Wechselwirkung bezeichnet²⁹. Die beiden Teilchen eines Paares unterscheiden sich sowohl in ihrer schwachen Ladungszahl I als auch in ihrer elektrischen Ladungszahl Z immer genau um den Betrag eins. Diese Ladungsdifferenzen sind kein Zufall, sondern hängen mit den schwachen und elektrischen Ladungszahlen der W -Teilchen zusammen, die ebenfalls jeweils den Betrag eins haben und bei der Emission bzw. Absorption dieser Botenteilchen alle Ladungen erhalten bleiben müssen.

In den Dupletts hat immer ein Teilchen die schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$ und das andere die schwache Ladungszahl $I = -\frac{1}{2}$, wie z. B. das Elektron-Neutrino und das Elektron, die folgendes Duplett bilden:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} I = +\frac{1}{2} & Z = 0 \\ I = -\frac{1}{2} & Z = -1 \end{array}$$

Über die Emission eines W -Teilchens sind die folgenden beiden Umwandlungen innerhalb dieses Dupletts möglich.

$$e^- \rightarrow \nu_e + W^-$$

$$\nu_e \rightarrow e^- + W^+$$

Ein Elektron kann sich durch Emission eines W^- -Teilchens in ein Elektron-Neutrino umwandeln, und durch die Emission eines W^+ -Teilchens kann aus einem Elektron-Neutrino ein Elektron entstehen.

Wie bei jeder Wechselwirkung sind bei diesen Umwandlungen alle Ladungen erhalten. Bei der Umwandlung eines Elektrons in ein Elektron-Neutrino über die Emission eines W^- -Teilchens gelten z. B. die folgenden drei Erhaltungssätze:

1) Erhalt der elektrischen Ladung

$$\begin{aligned} Z_{e^-} &= Z_{\nu_e} + Z_{W^-} \\ -1 &= 0 + (-1) \\ -1 &= -1 \end{aligned}$$

2) Erhalt der schwachen Ladung

$$\begin{aligned} I_{e^-} &= I_{\nu_e} + I_{W^-} \\ -\frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} + (-1) \\ -\frac{1}{2} &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

3) Erhalt der starken Ladung

$$\begin{aligned} \vec{C}_{e^-} &= \vec{C}_{\nu_e} + \vec{C}_{W^-} \\ \vec{0} &= \vec{0} + \vec{0} \\ \vec{0} &= \vec{0} \end{aligned}$$

²⁹ Dupletts der schwachen Ladung sind die einfachsten Multipletts von Materieteilchen, innerhalb derer Umwandlungen über W -Teilchen realisierbar sind. Prinzipiell würde das Standardmodell auch schwache Ladungsmultipletts mit mehr als zwei elementaren Materieteilchen erlauben (z. B. Quintetts, in denen elementare Teilchen mit $I = +2, +1, 0, -1, -2$ und $Z = +2, +1, 0, -1, -2$ vorkommen könnten, die aber bisher nicht beobachtet wurden). Die Natur scheint sich bei Materieteilchen auf die einfachste Möglichkeit, nämlich Dupletts, zu beschränken.

Aus der Umwandlungsgleichung $e^- \rightarrow \nu_e + W^-$ lassen sich weitere mögliche Prozesse ableiten. Da solche Umwandlungsgleichungen letztendlich Zusammenfassungen der obigen Erhaltungssätze sind, können sie analog zu diesen Gleichungen behandelt werden. Durch „Subtraktion“ des W^- -Teilchens in der Umwandlungsgleichung ergibt sich:

$$e^- + (-W^-) \rightarrow \nu_e$$

Der Ausdruck $(-W^-)^{30}$ ist dabei so zu interpretieren, dass es sich dabei um ein Teilchen handelt, welches genau die zum W^- -Teilchen entgegengesetzten Ladungen besitzt, da unter diesen Bedingungen die Erhaltungssätze weiterhin erfüllt bleiben. Es muss sich demnach um das Anti-Teilchen des W^- -Teilchens, also das W^+ -Teilchen, handeln. Die Umwandlungsgleichung lautet dann wie folgt:

$$e^- + W^+ \rightarrow \nu_e$$

Ein Elektron kann sich also durch Absorption eines W^+ -Teilchens in ein Elektron-Neutrino umwandeln. Entsprechend kann aus der Umwandlungsgleichung $\nu_e \rightarrow e^- + W^+$ die folgende mögliche Umwandlung hergeleitet werden:

$$\nu_e + W^- \rightarrow e^-$$

Insgesamt sind über die schwache Wechselwirkung also die folgenden vier Umwandlungen zwischen Elektron und Elektron-Neutrino möglich:

Emission eines Botenteilchens	Absorption eines Botenteilchens
$e^- \rightarrow \nu_e + W^-$	$e^- + W^+ \rightarrow \nu_e$
$\nu_e \rightarrow e^- + W^+$	$\nu_e + W^- \rightarrow e^-$

Ein weiteres Duplett bezüglich der schwachen Ladung kann aus dem Up- und dem Down-Quark gebildet werden:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{matrix} I = +\frac{1}{2} & Z = +\frac{2}{3} \\ I = -\frac{1}{2} & Z = -\frac{1}{3} \end{matrix}$$

Da die W -Teilchen keine starke Farbladung besitzen, kann sich bei der Emission bzw. Absorption dieser Teilchen die Farbladung der beteiligten Quarks nicht ändern. Es sind also die folgenden Umwandlungen durch Emission eines W -Teilchens möglich:

Emission eines W^- -Teilchens	Emission eines W^+ -Teilchens
$d \uparrow \rightarrow u \uparrow + W^-$	$u \uparrow \rightarrow d \uparrow + W^+$
$d \downarrow \rightarrow u \downarrow + W^-$	$u \downarrow \rightarrow d \downarrow + W^+$

Außerdem sind über die Absorption eines W -Teilchens die folgenden Umwandlungen möglich:

Absorption eines W^+ -Teilchens	Absorption eines W^- -Teilchens
$d \uparrow + W^+ \rightarrow u \uparrow$	$u \uparrow + W^- \rightarrow d \uparrow$
$d \downarrow + W^+ \rightarrow u \downarrow$	$u \downarrow + W^- \rightarrow d \downarrow$

Bei all diesen Umwandlungen sind alle drei Ladungen erhalten. Für die Umwandlung $d \uparrow \rightarrow u \uparrow + W^-$ beispielsweise gelten die folgenden drei Erhaltungssätze:

1) Erhalt der elektrischen Ladung

$$\begin{aligned} Z_{d \uparrow} &= Z_{u \uparrow} + Z_{W^-} \\ -\frac{1}{3} &= +\frac{2}{3} + (-1) \\ -\frac{1}{3} &= -\frac{1}{3} \end{aligned}$$

2) Erhalt der schwachen Ladung

$$\begin{aligned} I_{d \uparrow} &= I_{u \uparrow} + I_{W^-} \\ -\frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} + (-1) \\ -\frac{1}{2} &= -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

3) Erhalt der starken Ladung

$$\vec{C}_d = \vec{C}_u + \vec{C}_{W^-}$$

$$\uparrow = \uparrow + \vec{0}$$

$$\uparrow = \uparrow$$

Und auch zusammengesetzte Teilchen wie das Proton und das Neutron können Dupletts bilden:

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \begin{matrix} I = +\frac{1}{2} & Z = +1 \\ I = -\frac{1}{2} & Z = 0 \end{matrix}$$

Mit dem Z-Teilchen existiert ein weiteres Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung, welches in den bisherigen Betrachtungen weitestgehend außen vor gelassen wurde. Da das Z-Teilchen allerdings keinerlei Ladung besitzt ($Z = 0$, $I_Z = 0$, und $\vec{C}_Z = \vec{0}$) und bei einer Wechselwirkung alle drei Ladungen erhalten sein müssen, ändern sich bei der Emission oder Absorption eines Z-Teilchens die Ladungen des Materieteilchens nicht. Bei einer Wechselwirkung mit einem Z-Teilchen wird daher z. B. niemals ein Up- in ein Down-Quark (oder umgekehrt) umgewandelt, da sich bei solch einer Umwandlung sowohl die schwache Ladungszahl als auch die elektrische Ladungszahl ändern würden. Aus demselben Grund wird über ein Z-Teilchen niemals ein Elektron in ein Elektron-Neutrino (oder umgekehrt) umgewandelt. Mögliche Wechselwirkungen mit einem Z-Teilchen (hier: Emission) sind dagegen:

$$\begin{array}{ll} u \uparrow \rightarrow u \uparrow + Z & d \uparrow \rightarrow d \uparrow + Z \\ u \downarrow \rightarrow u \downarrow + Z & d \downarrow \rightarrow d \downarrow + Z \\ e^- \rightarrow e^- + Z & \nu_e \rightarrow \nu_e + Z \end{array} \quad \text{sowie}$$

Anti-Materieteilchen bilden ebenfalls Dupletts, innerhalb derer die Teilchen mithilfe der schwachen Ladungszahl geordnet werden. Da per Konvention bei einem Duplett immer das Teilchen mit der schwachen Ladungszahl $+\frac{1}{2}$ oben steht, kehren sich bei Anti-Materieteilchen die Duplett-Einträge im

Vergleich zu den Dupletts aus den jeweils zugehörigen Materieteilchen um:

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \begin{matrix} I = +\frac{1}{2} & Z = +1 \\ I = -\frac{1}{2} & Z = 0 \end{matrix}$$

Innerhalb all dieser Dupletts ändert sich sowohl die elektrische Ladungszahl Z als auch die schwache Ladungszahl I von „unten“ nach „oben“ um $+1$.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Ladungen helfen, die Materieteilchen in Dupletts bezüglich der schwachen Ladung zu ordnen und zu verstehen, welche Teilchenumwandlungen erlaubt sind und welche nicht. Über die schwache Wechselwirkung können durch Absorption oder Emission eines Botenteilchens jeweils nur Teilchen ineinander umgewandelt werden, die sich in einem gemeinsamen Duplett befinden.

2.4.4 Starke Wechselwirkung: Gluonen

Die starke Wechselwirkung besitzt ebenfalls nur eine sehr kurze Reichweite. Sie beträgt ca. 2 fm. Die Ursache der kurzen Reichweite liegt jedoch nicht darin, dass die Botenteilchen massebehaftet sind (wie im Falle der schwachen Wechselwirkung), sondern dass sich jenseits eines Abstands von wenigen fm aus der bei zunehmendem Abstand stark zunehmenden potenziellen Energie neue Quark-Anti-Quark-Paare bilden (siehe Kapitel 2.2.3). Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, nimmt die starke Kraft ab einem Abstand von etwa 0,2 fm einen konstanten Wert an, ändert sich also bei weiter zunehmendem Abstand nicht. Versucht man ein derartiges Verhalten im Feldlinienmodell zu beschreiben, erhält man automatisch einen Widerspruch. Da die Feldlindichte ein Maß für die Stärke der wirkenden Kraft ist, müsste diese Dichte mit zunehmendem Abstand ebenfalls konstant bleiben. Dies ist nur möglich, wenn spontan, also ohne Vorhandensein weiterer stark geladener Teilchen, neue Feldlinien entstehen (siehe Abb. 30). Für die Beschreibung der Abstandsabhängigkeit der starken Kraft ist das klassische

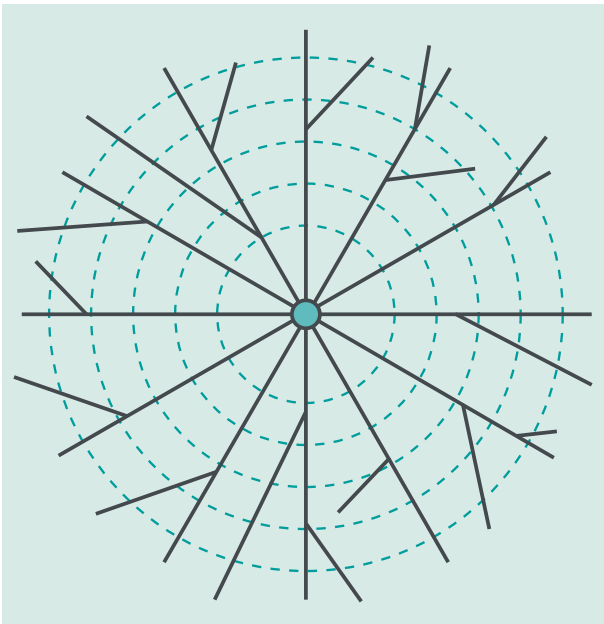


Abb. 30: Visualisierung der Konstanz der starken Kraft bei zunehmendem Abstand im Feldlinienmodell

Feldlinienmodell also offenbar nur eingeschränkt geeignet, da dieses die spontane Entstehung neuer Feldlinien nicht zulässt. Die starke Wechselwirkung muss also ebenfalls mit Hilfe von Botenteilchen beschrieben werden.

Der starken Wechselwirkung unterliegen nur Teilchen, die Farbladungsvektoren besitzen. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, kommen die Quarks mit den drei verschiedenen Farbladungsvektoren \rightarrow (rot), \rightarrow (grün) und \downarrow (blau) und die Anti-Quarks mit den drei Farbladungsvektoren \leftarrow (anti-rot), \leftarrow (anti-grün) sowie \uparrow (anti-blau) vor.

Die Botenteilchen der starken Wechselwirkung sind die acht sogenannten Gluonen (engl. glue = kleben). Die Gluonen besitzen keine Masse ($m_{g_i} = 0, i = 1, \dots, 8$), sind elektrisch neutral ($Z_{g_i} = 0, i = 1, \dots, 8$) und besitzen keine schwache Ladung ($I_{g_i} = 0, i = 1, \dots, 8$). Sie besitzen jedoch Farbladungsvektoren, in denen sie sich unterscheiden. Die acht Farbladungsvektoren der Gluonen sind Summen von Farbladungsvektoren der Anti-/Quarks. Sechs der insgesamt acht Gluonen besitzen je eine

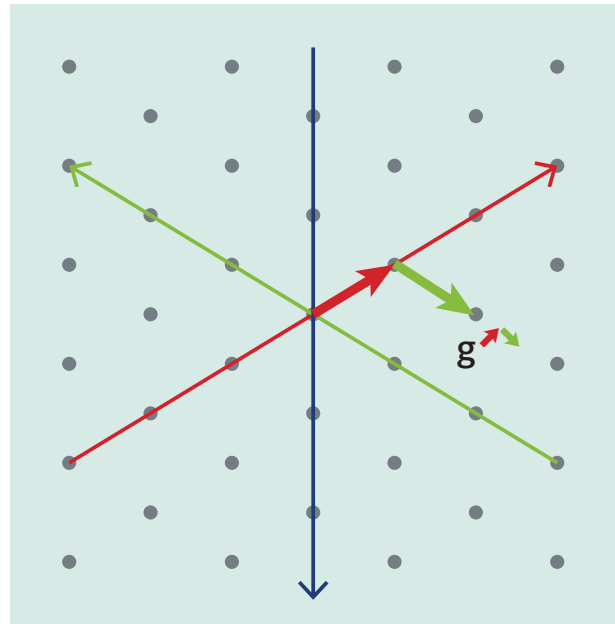


Abb. 31: Farbladungsvektor des rot-anti-grünen Gluons dargestellt als vektorielle Summe eines roten und eines anti-grünen Farbladungsvektors auf dem Farbgitter

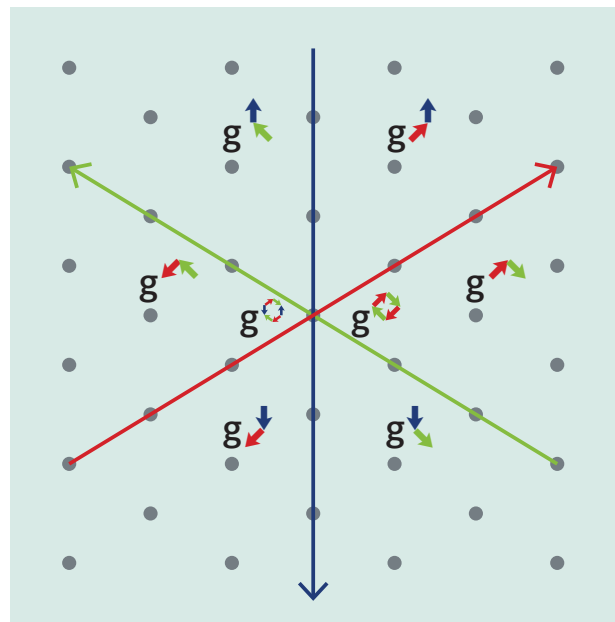


Abb. 32: Die Gitterpunkte aller acht Gluonen auf dem Farbgitter

Farbe und eine Anti-Farbe und werden mit $g^{\rightarrow\leftarrow}$ (rot-anti-grünes Gluon), $g^{\rightarrow\uparrow}$ (rot-anti-blaues Gluon), $g^{\downarrow\leftarrow}$ (blau-anti-grünes Gluon), $g^{\downarrow\uparrow}$ (blau-anti-rot Gluon), $g^{\leftarrow\rightarrow}$ (grün-anti-rot Gluon), $g^{\leftarrow\uparrow}$ (grün-anti-blaues Gluon) bezeichnet. Diese sechs Gluonen

lassen sich, genau wie die Quarks und die Anti-Quarks, einzelnen Gitterpunkten im Farbgitter zuordnen. In Abb. 31 beispielsweise ist der Gitterpunkt des rot-anti-grünen Gluons auf dem Farbgitter dargestellt. Er ergibt sich aus der vektoriellen Summe eines roten und eines anti-grünen Farbladungsvektors.

Die starken Ladungen der verbleibenden zwei Gluonen sind auf kompliziertere Weise aus Farbladungsvektoren zusammengesetzt und werden im Folgenden mit $g^{\text{rot-grün}}$ und $g^{\text{blau-rot}}$ bezeichnet. Da sich die Farbladungsvektoren dieser beiden Gluonen insgesamt zum Nullvektor addieren, befinden sich diese beiden Gluonen im Koordinatenursprung des Farbgitters. Die Gitterpunkte aller acht Gluonen sind in Abb. 32 dargestellt.

Dass Gluonen selbst eine starke Ladung besitzen, ist der tiefliegende Grund dafür, dass die starke Wechselwirkung nur eine begrenzte Reichweite von 1-2 fm besitzt: Die Gluonen treten miteinander in Wechselwirkung und ziehen sich gegenseitig an³¹. Im Feldlinienmodell führt dies dazu, dass sich die Feldlinien der starken Wechselwirkung zwischen zwei sich anziehenden Quarks oder zwischen Quark und Anti-Quark ab einem Abstand von ca. 0,2 fm zu einer Art „Schlauch“ zusammenziehen (siehe Abb. 33).

Das Besondere an diesem Feldlinien-Schlauch ist, dass die Feldlinien parallel sind, sich also der Abstand benachbarter Feldlinien innerhalb des Schlauchs nicht ändert und zum anderen unabhängig davon ist,

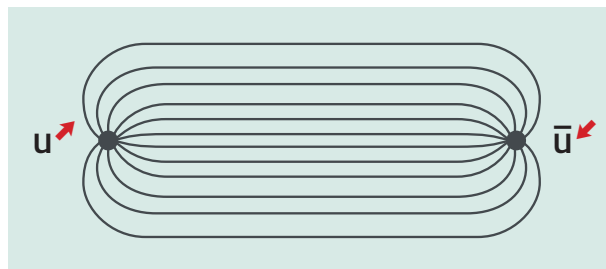


Abb. 33: Feldlinien-Schlauch der starken Wechselwirkung zwischen zwei Quarks

ob die beiden wechselwirkenden Quarks 0,2 fm oder weiter voneinander entfernt sind. Dies führt dazu, dass ab einem Abstand von ca. 0,2 fm die Kraft zwischen den Quarks konstant ist und nicht mehr vom Abstand der Quarks abhängt. Vergrößert sich der Abstand der Quarks zueinander, so ist die im System gespeicherte Energie bei einem Abstand von ca. 1-2 fm groß genug, damit ein neues Quark-Anti-Quark-Paar entstehen kann. Dieses neue Quark-Anti-Quark-Paar bildet anschließend mit den ursprünglichen Quarks je ein Hadron, d. h. ein aus Anti-/Quarks bestehendes Teilchen ohne resultierende Farbladung (siehe Abb. 34). Dieses Phänomen wird als „Confinement“ bezeichnet und ist der Grund dafür, dass die starke Wechselwirkung zwischen Quarks effektiv eine endliche Reichweite von 1-2 fm besitzt.

Da die Gluonen ausschließlich starke Farbladungen und keine weiteren Ladungen besitzen, kann aufgrund der starken Wechselwirkung die elektrische und die schwache Ladung eines Teilchens nicht geändert werden. Bei der starken Wechselwirkung

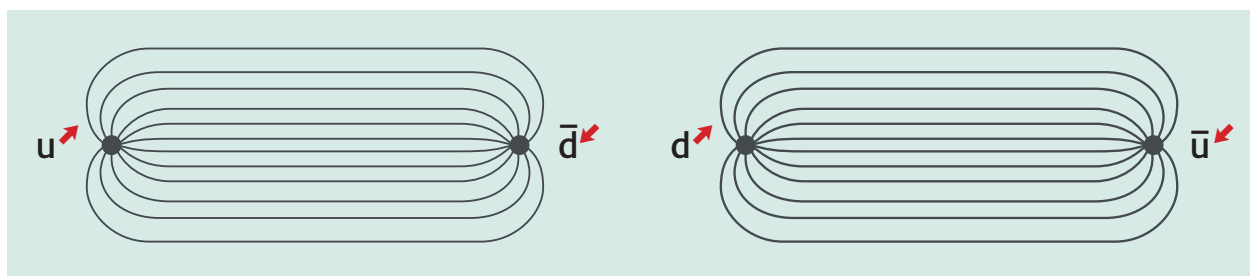


Abb. 34: Quark-Anti-Quark-Paar, entstanden aus der Feldenergie zwischen zwei Quarks aufgrund der starken Wechselwirkung (Confinement)

³¹ Da Gluonen selbst stark geladen sind, können sie außerdem - genau wie Quarks - weitere Gluonen emittieren, was im Feldlinienbild als spontane Entstehung neuer Feldlinien gedeutet werden kann.

kann ausschließlich die Farbladung eines Quarks oder Anti-Quarks geändert werden. Die Quarks und Anti-Quarks bilden daher sogenannte Farb-Triplets:

$$\begin{pmatrix} u \uparrow, u \downarrow, u \uparrow \\ d \uparrow, d \downarrow, d \uparrow \\ \bar{d} \uparrow, \bar{d} \downarrow, \bar{d} \uparrow \\ \bar{u} \uparrow, \bar{u} \downarrow, \bar{u} \uparrow \end{pmatrix}$$

Über die starke Wechselwirkung können nur Anti-/Teilchen innerhalb eines solchen Triplets ineinander umgewandelt werden. Diese Umwandlungen geschehen durch Emission oder Absorption eines der sechs Gluonen, die eine resultierende Farbladung besitzen (sich also nicht im Koordinatenursprung des Farbgitters befinden). Auf diese Weise sind beliebige Umwandlungen zwischen den drei Anti-/Quarks eines Farb-Triplets möglich.

So ist es aufgrund der starken Wechselwirkung beispielsweise möglich, dass ein Up-Quark mit blauem Farbladungsvektor ($u \downarrow$) durch Emission eines blau-anti-grünen Gluons ($g \uparrow$) in ein Up-Quark mit grünem Farbladungsvektor ($u \downarrow$) umgewandelt wird:

$$u \downarrow \rightarrow u \downarrow + g \uparrow$$

Bei dieser Teilchenumwandlung sind alle drei Ladungen erhalten, denn es gelten die folgenden drei Erhaltungssätze:

1) Erhalt der elektrischen Ladung

$$\begin{aligned} Z_{u \downarrow} &= Z_{u \downarrow} + Z_{g \uparrow} \\ +\frac{2}{3} &= +\frac{2}{3} + 0 \\ +\frac{2}{3} &= +\frac{2}{3} \end{aligned}$$

2) Erhalt der schwachen Ladung

$$\begin{aligned} I_{u \downarrow} &= I_{u \downarrow} + I_{g \uparrow} \\ +\frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} + 0 \\ +\frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} \end{aligned}$$

3) Erhalt der starken Ladung

$$\begin{aligned} \vec{C}_{u \downarrow} &= \vec{C}_{u \downarrow} + \vec{C}_{g \uparrow} \\ \downarrow &= \downarrow + \uparrow \\ \downarrow &= \downarrow \end{aligned}$$

Entsprechend sind durch Emission eines Gluons zudem z.B. die folgenden Umwandlungen zwischen Quarks aufgrund der starken Wechselwirkung möglich:

$$\begin{aligned} u \uparrow &\rightarrow u \uparrow + g \uparrow & d \uparrow &\rightarrow d \uparrow + g \uparrow \\ u \downarrow &\rightarrow u \downarrow + g \uparrow & d \downarrow &\rightarrow d \downarrow + g \uparrow \end{aligned}$$

Weiterhin sind durch Absorption eines Gluons u. a. die folgenden Umwandlungen möglich:

$$\begin{aligned} u \uparrow + g \uparrow &\rightarrow u \uparrow & d \uparrow + g \uparrow &\rightarrow d \uparrow \\ u \downarrow + g \uparrow &\rightarrow u \downarrow & d \downarrow + g \uparrow &\rightarrow d \downarrow \end{aligned}$$

Diese Umwandlungen gehen direkt aus den obigen vier Umwandlungen durch die Umformung der Umwandlungsgleichung, wie es in Kapitel 2.4.3 bezüglich der schwachen Wechselwirkung über W-Teilchen beschrieben wurde, hervor. Ein Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor kann demnach auf zwei verschiedenen Arten in ein Up-Quark mit grünem Farbladungsvektor umgewandelt werden. Zum einen ist dies über die Emission eines rot-anti-grünen Gluons möglich ($u \uparrow \rightarrow u \downarrow + g \uparrow$). Zum anderen kann dies durch die Absorption des zu diesem Quark gehörigen Anti-Teilchens, also eines grün-anti-roten Gluons, geschehen ($u \uparrow + g \downarrow \rightarrow u \downarrow$).

Bei Emission oder Absorption eines Anti-/Quarks mit einem der beiden farbneutralen Gluonen g^0 und g^0 verändert sich der Farbladungsvektor des Anti-/Quarks nicht:

$$\begin{aligned} u \uparrow &\rightarrow u \uparrow + g^0 & d \uparrow &\rightarrow d \uparrow + g^0 \\ u \downarrow &\rightarrow u \downarrow + g^0 & d \downarrow &\rightarrow d \downarrow + g^0 \end{aligned}$$

Die Umwandlung beispielsweise eines Up-Quarks in ein Down-Quark (oder umgekehrt) ist über die starke Wechselwirkung nicht möglich, weil diese

Umwandlung die Erhaltungssätze der elektrischen Ladungszahl Z sowie der schwachen Ladungszahl I verletzen würde.

Materieteilchen lassen sich also aufgrund ihrer Ladungen in Multipletts ordnen. Bezüglich der schwachen Ladung existieren Dupletts mit zwei Anti-/Teilchen, und bezüglich der starken Ladung existieren Tripletts mit drei Anti-/Teilchen. Durch Emission und Absorption von Botenteilchen der jeweiligen Wechselwirkungen sind Umwandlungen zwischen den Anti-/Teilchen innerhalb eines Multipletts möglich. Über die elektromagnetische Wechselwirkung sind durch Emission oder Absorption von Photonen keine Umwandlungen möglich, da Photonen weder eine elektrische noch eine schwache oder starke Ladung besitzen. In der Multiplett-Darstellung bedeutet dies, dass alle Anti-/Teilchen bezüglich der elektrischen Ladung Singulets (Multipletts mit nur einem Teilchen) bilden. Weiterhin bilden alle Anti-/Teilchen, die keine Farbladung besitzen, Singulets bezüglich der starken Ladung, da diese Anti-/Teilchen nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen und sich daher insbesondere nicht über die Emission oder Absorption von Gluonen umwandeln können.

2.4.5 Gravitative Wechselwirkung

Die Gravitationskraft zwischen zwei massebehafteten Teilchen, die sich in einem Abstand r zueinander befinden, ist proportional zum Produkt der Teilchenmassen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes. Somit besitzt die gravitative Wechselwirkung eine unendliche Reichweite und lässt sich, genau wie die elektromagnetische Wechselwirkung, mit dem klassischen Feldlinienmodell beschreiben. Man könnte nun auf die Idee kommen, die gravitative Wechselwirkung auf der Ebene der Elementarteilchen, analog zur elektromagnetischen Wechselwirkung, ebenfalls durch den Austausch eines masselosen Botenteilchens, des sogenannten Gravitons, zu beschreiben. Die genaue Ausarbeitung dieser Beschreibung ist jedoch bis heute nicht gelungen, da der gravitativen

Wechselwirkung ein anderes physikalisches Prinzip zugrunde liegt als beispielsweise der elektromagnetischen Wechselwirkung: Die elektromagnetischen Wechselwirkung wird durch sich in der Raum-Zeit bewegende Botenteilchen vermittelt, während sich bei der gravitativen Wechselwirkung die Raum-Zeit selbst bewegt und krümmt. Nach dem hypothetischen Graviton wird intensiv gesucht, es wurde bis heute aber nicht entdeckt. Außerdem kennt man keine zur gravitativen Wechselwirkung gehörende Ladung. Die Masse kann nicht die zur gravitativen Wechselwirkung gehörende Ladung sein, da sie keine Erhaltungsgröße ist, was eine Anforderung an eine Ladung im Sinne des Standardmodells darstellt. Darüber hinaus gibt es keine negativen Massen, weshalb die gravitative Wechselwirkung im Gegensatz zu den drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells lediglich anziehende und keine abstoßenden Kräfte hervorrufen kann. Anti-Teilchen besitzen also dieselbe positive Masse wie die zugehörigen Teilchen. Wäre die Masse eine Ladung im Sinne des Standardmodells, so müsste sie zwischen Teilchen und Anti-Teilchen ihr Vorzeichen wechseln.

2.5 FEYNMAN-DIAGRAMME

Die Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen können durch sogenannte Feynman-Diagramme graphisch veranschaulicht werden. Ein Feynman-Diagramm stellt dar, wie die wechselwirkenden Teilchen miteinander interagieren. Es illustriert, wie neue Teilchen entstehen oder vorhandene Teilchen vernichtet werden. Zudem wird veranschaulicht, wie Anziehung und Abstoßung zwischen Materieteilchen durch den Austausch von Botenteilchen vermittelt werden. Darüber hinaus können aus Feynman-Diagrammen die zugehörigen Prozesswahrscheinlichkeiten abgelesen werden.

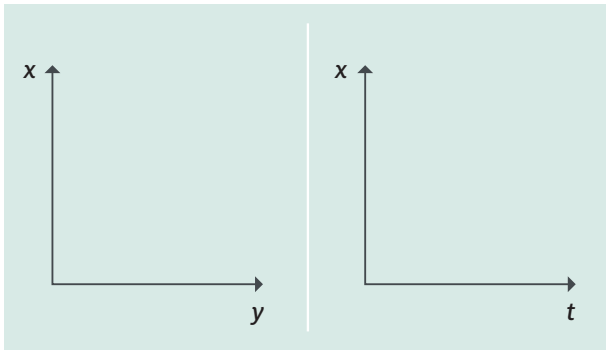


Abb. 35: Achsen eines x - y -Diagramms (links) und eines x - t -Diagramms (rechts)

Im Folgenden werden Feynman-Diagramme als Ort-Zeit-Diagramme eingeführt. (Eine Abgrenzung zur streng theoretischen Interpretation ist im Infokasten auf Seite 57 zu finden.) Eine Vorstufe dazu stellen Ort-Ort-Diagramme dar. In diesen ist auf der Abszisse die y -Koordinate und auf der Ordinate die x -Koordinate des Teilchens (d. h. des Wellenpakets, welches das Teilchen beschreibt) dargestellt. Im Ort-Zeit-Diagramm ist auf der Abszisse die Zeit und auf der Ordinate die x -Koordinate des Teilchens dargestellt (siehe Abb. 35 rechts).

Im x - y -Diagramm werden sich bewegende Teilchen durch Linien dargestellt, die an einem Ort (x_1, y_1) beginnen und an einem anderen Ort (x_2, y_2) enden. Ruhende Teilchen werden durch einen Punkt dargestellt. Im x - t -Diagramm werden alle Teilchen durch Linien dargestellt, die an einem Ort zu einem

Zeitpunkt (x_1, t_1) beginnen und an einem Ort zu einem anderen Zeitpunkt (x_2, t_2) enden. Im Falle eines ruhenden Teilchens sind die Orte x_1 und x_2 identisch. Ein ruhendes Teilchen wird demnach durch eine horizontale Linie visualisiert. Jede Teilchenart wird dabei durch einen anderen Linientyp dargestellt (siehe Abb. 36):

Materieteilchen (Quarks, Elektronen oder Neutrinos) sind durch eine durchgezogene Linie mit einem Pfeil in der Mitte, der im x - t -Diagramm in die positive zeitliche Richtung, d. h. nach rechts, zeigt, dargestellt. Anti-Materieteilchen (Anti-Quarks, Positronen oder Anti-Elektron-Neutrinos) werden in Form einer durchgezogenen Linie mit einem Pfeil in der Mitte gezeichnet, der im x - t -Diagramm in die negative zeitliche Richtung, d. h. nach links, zeigt. Ein Photon, W - oder Z -Teilchen wird durch eine gewellte Linie und ein Gluon durch eine gekringelte Linie, jeweils ohne Pfeil, dargestellt.

Die Wechselwirkung zwischen Teilchen bildet man in einem x - t -Diagramm dadurch ab, dass die Teilchenlinien an einem Punkt des Diagramms zusammentreffen. Ein solcher Treffpunkt heißt Vertex (Plural: Vertices). Im Folgenden werden die Vertices der drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells genauer betrachtet.

2.5.1 Vertices

Die drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells werden auf der Ebene der Elementarteilchen durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben (siehe Kapitel 2.4.2). Das umfasst die anziehenden und die abstoßenden Kräfte, die Umwandlung von Teilchen sowie die Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.

All diese Phänomene können durch verschiedene Feynman-Diagramme³² beschrieben werden, die auf vier Feynman-Diagramm-Grundbausteinen basieren, die im Folgenden näher erläutert werden. Diese Grundbausteine beschreiben eine Wechselwirkung zweier Anti-/Materieteilchen mit einem Botenteil-

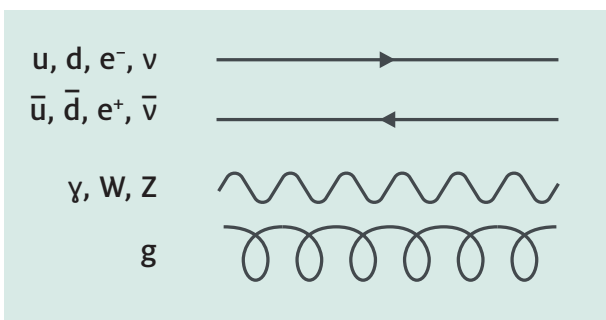


Abb. 36: Linientypen für ein Materieteilchen (oben), ein Anti-Materieteilchen (zweite von oben), ein Photon, W - oder Z -Teilchen (dritte von oben) und ein Gluon (unten) in einem Feynman-Diagramm

³² Feynman-Diagramme können entweder im Ort-Zeit-Raum oder im Impuls-Energie-Raum beschrieben werden. Zur leichteren Vorstellbarkeit zeichnen wir sie hier als Ort-Zeit-Diagramme. Die Berechnung im Impuls-Energie-Raum hat jedoch zur Folge, dass örtliche Lage und zeitliche Reihenfolge der Vertices ihre Bedeutung verlieren (siehe auch Infokasten auf Seite 57).

chen. Bei jedem dieser Bausteine handelt es sich um einen Vertex, an dem sich drei Linien treffen, wobei jeweils genau eine Botenteilchen-Linie vorhanden ist. Deshalb werden die Grundbausteine im Folgenden allgemein als Vertices (Singular: Vertex) bezeichnet.

2.5.2 Emission eines Botenteilchens

Ein Materie- oder Anti-Materieteilchen kann spontan ein Botenteilchen emittieren, wenn es eine zu dem Botenteilchen, d. h. zu der zugehörigen Wechselwirkung, gehörende Ladung besitzt. Dabei kann eine Umwandlung des Materieteilchens stattfinden. Der Vertex, der solch eine Emission beschreibt, ist in Abb. 37 dargestellt. Je nachdem, welche Ladungen das Materieteilchen besitzt, kann es sich bei dem Botenteilchen entweder um ein Photon, ein W-Teilchen, ein Z-Teilchen oder ein Gluon handeln. An einem solchen Vertex sind jeweils zwei Materieteilchen beteiligt, die sich bezüglich der entsprechenden Wechselwirkung in einem gemeinsamen Multipllett befinden³³.

Bei der Emission eines Botenteilchens ändert sich in der Regel sowohl die Energie als auch der Impuls des Anti-/Materieteilchens.

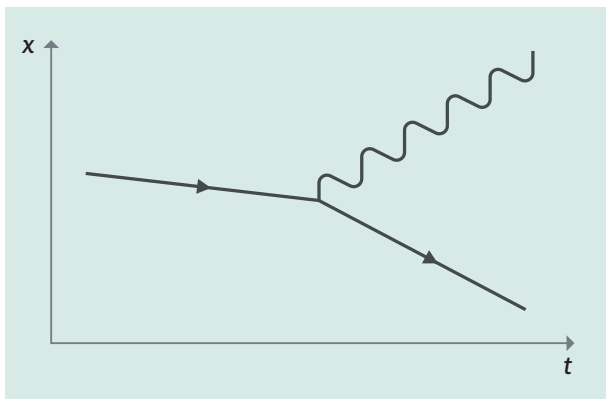


Abb. 37: Vertex der Emission eines Botenteilchens durch ein Materieteilchen

Im Falle masseloser Botenteilchen, also Photonen oder Gluonen, müssen bei einem physikalisch vollständigen Prozess weitere Teilchen an einem zweiten Vertex entstehen oder absorbiert werden³⁴, da sonst Energie- und Impuls-Erhaltung nicht gleichzeitig erfüllt werden können. Bei solchen Prozessen entstehen in den vollständigen Diagrammen „innere Linien“, die so genannte „virtuelle Teilchen“ darstellen. Diese Bemerkung gilt gleichermaßen für alle folgenden Vertices.

2.5.3 Absorption eines Botenteilchens

Ebenso ist es möglich, dass ein Materie- oder Anti-Materieteilchen ein Botenteilchen absorbiert, wobei ebenfalls eine Umwandlung stattfinden kann. Der Vertex, der solch eine Absorption beschreibt, ist in Abb. 38 dargestellt.

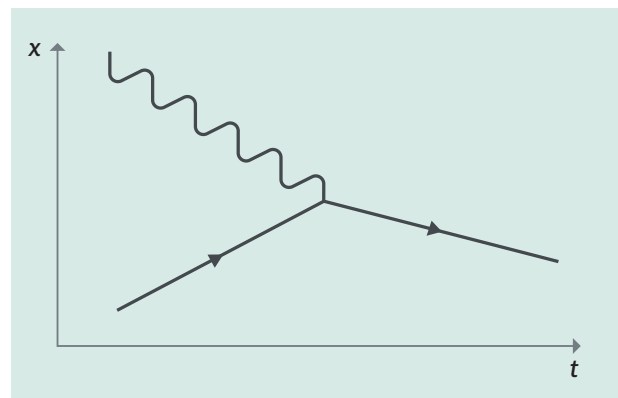


Abb. 38: Vertex der Absorption eines Botenteilchens durch ein Materieteilchen

Auch bei der Absorption des Botenteilchens ändern sich in der Regel die Energie und der Impuls des Anti-/Materieteilchens. An einem solchen Vertex sind ebenfalls jeweils zwei Anti-/Materieteilchen beteiligt, die sich in einem gemeinsamen Multipllett befinden.

³³ Sofern es sich um ein Singulett handelt, sind die am Vertex beteiligten Materieteilchen identisch, da keine Umwandlung stattfinden kann.

³⁴ Beispielsweise kann wie bei der Comptonstreuung $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$ (siehe unten) ein weiteres Botenteilchen absorbiert werden.

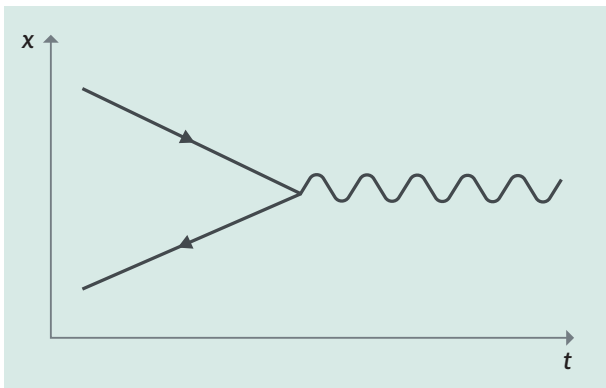


Abb. 39: Vertex der Paarvernichtung eines Materieteilchens (obere Linie) und eines Anti-Materieteilchens (untere Linie)

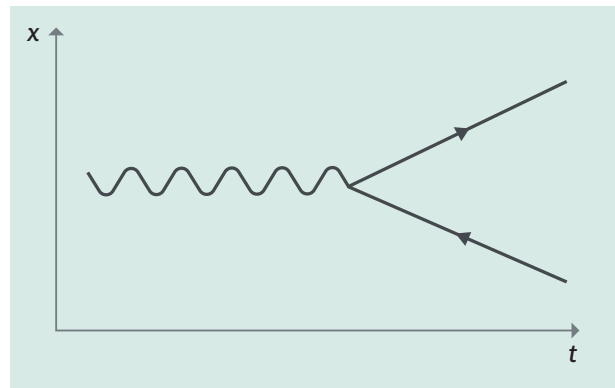


Abb. 40: Vertex der Paarerzeugung eines Teilchens (obere Linie) und eines Anti-Teilchens (untere Linie) aus einem Botenteilchen

2.5.4 Paarvernichtung

Neben der Emission und der Absorption eines Botenteilchens durch ein Anti-/Materieteilchen ist es ebenfalls möglich, dass sich ein Teilchen und ein Anti-Teilchen gegenseitig auslöschen, wobei ein Botenteilchen entsteht. Diesen Prozess nennt man Paarvernichtung. Der zugehörige Vertex ist in Abb. 39 dargestellt.

2.5.5 Paarerzeugung

Der zur Paarvernichtung entgegengesetzte Prozess ist die sogenannte Paarerzeugung. Dabei wandelt sich ein Botenteilchen in ein Teilchen und ein Anti-Teilchen um. Der zu diesem Prozess gehörende Vertex ist in Abb. 40 dargestellt³⁵.

Die vier in Abb. 37 bis Abb. 40 dargestellten Vertices gehen auseinander hervor, indem man die Teilchenlinien wie die Zeiger einer Uhr um den Teilchentreffpunkt dreht: Den Vertex der Botenteilchen-Absorption (Abb. 38) erhält man beispielsweise aus dem Vertex der Botenteilchen-Emission (Abb. 37), indem man die Linie des Botenteilchens nach links klappt. Den Vertex der Paarvernichtung (Abb. 39)

erhält man aus dem Vertex der Botenteilchen-Emission (Abb. 37), indem man die Linie des auslaufenden Materieteilchens auf die linke Seite klappt. Auf diese Weise wird aus dem auslaufenden Materieteilchen ein einlaufendes Anti-Materieteilchen, da durch diese Drehung die Pfeilrichtung umgekehrt wurde³⁶.

Das Umklappen der Linien der Vertices ist nichts anderes als die Visualisierung der Umformung von Umwandlungsgleichungen, wie sie in Kapitel 2.4.3 und 2.4.4 beschrieben wurde. Dies bedeutet, dass man aus dem Vertex eines aufgrund der Ladungserhaltung erlaubten Prozesses durch Umklappen der Linien stets weitere erlaubte Prozesse ableiten kann. Dabei sind an einem Vertex der Botenteilchen-Emission und der Botenteilchen-Absorption jeweils Anti-/Materieteilchen aus einem gemeinsamen Multipllett vorhanden. Für die Vertices der Paarerzeugung und der Paarvernichtung folgt daraus, dass dabei jeweils ein Materieteilchen und ein zu einem Materieteilchen desselben Multipletts gehöriges Anti-Materieteilchen beteiligt sind.

³⁵ Sofern es sich um Prozesse der elektromagnetischen oder der starken Wechselwirkung handelt, müssen in einem vollständigen physikalischen Prozess bei Paarvernichtungen und Paarerzeugungen stets zwei Botenteilchen beteiligt sein, da sonst, je nach Bezugssystem, entweder die Energie- oder die Impulserhaltung verletzt wäre. Dies ist eine Folge der Tatsache, dass Photonen und Gluonen masselose Botenteilchen sind. Das zweite Botenteilchen wird bei der Paarvernichtung von einem der beiden annihilierenden Materieteilchen emittiert. Es entstehen dabei also stets zwei Botenteilchen. Bei der Paarerzeugung wird das zweite Botenteilchen von einem der beiden entstehenden Materieteilchen absorbiert oder emittiert. Ein Vertex der Paarvernichtung tritt also immer nur in Kombination mit einem Vertex der Botenteilchen-Emission auf, der Paarerzeugungs-Vertex hingegen stets nur in Kombination mit einem Vertex der Botenteilchen-Absorption oder -Emission.

³⁶ Die Anti-/Teilchen, die vor der Wechselwirkung vorhanden sind, werden auch als im Feynman-Diagramm einlaufende Anti-/Teilchen bezeichnet. Die nach der Wechselwirkung vorhandenen Anti-/Teilchen nennt man entsprechend auslaufende Anti-/Teilchen.

2.5.6 Energie-Impuls-Erhaltung und virtuelle Teilchen

An jedem Vertex sind die Energie und der Impuls erhalten. Somit ist die Summe der Energien/Impulse aller einlaufenden Teilchen gleich der Summe der Energien/Impulse aller auslaufenden Teilchen. Da die Energie-Impuls-Erhaltung für jeden Vertex gilt, gilt sie automatisch für ein aus mehreren Vertices zusammengesetztes Feynman-Diagramm.

Die Energie-Impuls-Erhaltung an jedem Vertex hat eine interessante Konsequenz: In einem Feynman-Diagramm kann es passieren, dass im Inneren des Diagramms Teilchen auftreten, die eine Kombination von Energie und Impuls besitzen, die nicht der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung $E = \sqrt{p^2 c^2 + E_0^2}$ entspricht, die man bei der entsprechenden Teilchenmasse erhalten würde. So muss z. B. die Energie des W-Teilchens bei der β -Umwandlung eines ruhenden Neutrons $E = m_n \cdot c^2 - m_p \cdot c^2 = 1,3 \text{ MeV}$ betragen, obwohl selbst ein ruhendes W-Teilchen allein aufgrund seiner eigenen Masse bereits eine über 60.000-fach höhere Energie (Ruheenergie) von $E_0 = m_W \cdot c^2 = 80.400 \text{ MeV}$ besitzen müsste. Teilchen im Inneren eines Feynman-Diagramms nennt man deshalb virtuelle Teilchen. Sie besitzen zwar durch die ein- und auslaufenden Teilchen über die Energie- und Impulserhaltung an den Vertices genau definierte Werte von Energie und Impuls (und über andere Erhaltungssätze eine genau definierte Ladung, Drehimpuls und andere Quantenzahlen), eine Zuordnung der Eigenschaft „Masse“ und damit auch „Geschwindigkeit“ zu dem virtuellen Teilchen ist aber nicht mehr sinnvoll. In der in Abb. 41 gezeigten $E - p$ -Ebene können virtuelle Teilchen an einem beliebigen Punkt in der gesamten Ebene liegen.

Es gibt daher auch virtuelle Teilchen mit einem Impuls ($p > 0$), aber ohne Energie ($E = 0$) (wie z. B. ausgetauschte virtuelle Photonen im Schwerpunktsystem der elastischen Streuung zweier Elektronen) oder virtuelle Teilchen mit einer Energie ($E > 0$), aber ohne Impuls ($p = 0$) (z. B. bei der Paarvernich-

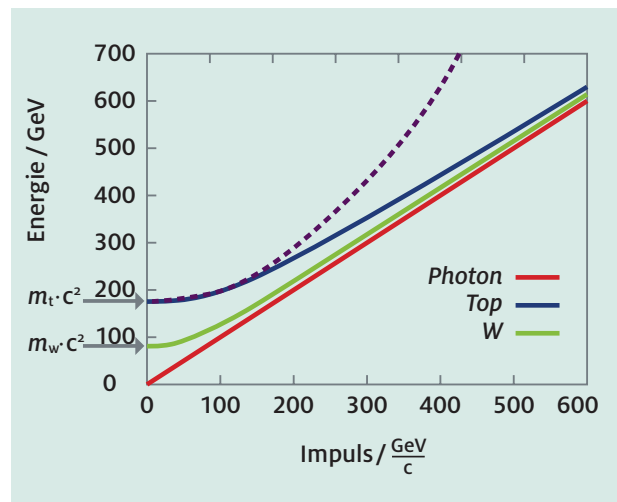


Abb. 41: Energie-Impuls-Beziehung für reelle Teilchen am Beispiel von Photon ($E = p \cdot c$), W-Teilchen und Top-Quark. Für kleine Impulse gilt beim W-Teilchen und dem Top-Quark näherungsweise die nicht-relativistische Beziehung $E = E_0 + \frac{p^2}{2m}$, die für das Top-Quark violett gestrichelt eingezeichnet ist. Bei großen Impulsen nähern sich die $E(p)$ -Kurven aller Teilchen der hoch-relativistischen Photon-Gerade $E(p) = p \cdot c$ an. Virtuelle Teilchen dürfen an jedem beliebigen Punkt in der $E-p$ -Ebene liegen.

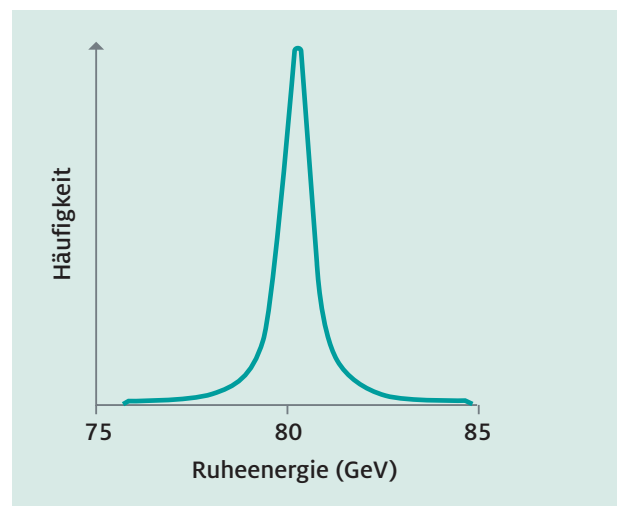


Abb. 42: Die Ruheenergieverteilung von W-Teilchen

tung von Elektron und Positron mit entgegengesetztem, betragsmäßig gleichem Impuls in ein virtuelles Photon, das die Summe der Energien beider Teilchen besitzt, und dessen Impuls gleich Null ist).

Die bei einer Reaktion ein- und auslaufenden Teilchen liegen dagegen genau auf den durch die spezielle Relativitätstheorie gegebenen Hyperbeln. Ein- und auslaufende Teilchen sind daher immer „reelle“ Teilchen.

Hat ein reelles Teilchen außerdem eine endliche mittlere Lebensdauer, so ist seine Masse mit einer Unschärfe behaftet. Die Ruheenergien von W-Teilchen sind daher z. B. wie in Abb. 42 um den Wert $E_0 = m_W \cdot c^2 = 80.400 \text{ MeV}$ verteilt. In Abb. 41 müsste daher die grüne Linie der reellen W-Teilchen und die blaue der reellen Top-Quarks im Vergleich zum Photon leicht verbreitert gezeichnet werden, was aber bei einer Breite von ca. 1-2 GeV im Bild kaum erkennbar wäre.

Würde man bei der β -Umwandlung des Neutrons die Ruheenergie des entstehenden virtuellen W-Teilchens aus der Formel $E_0 = \sqrt{E^2 - p^2 \cdot c^2}$ ausrechnen, so ergäbe sich ein Wert von höchstens 0,0013 GeV, weit jenseits des linken Randes der in Abb. 42 gezeigten Verteilung. Analog zu einer klassischen erzwungenen Schwingung mit einer Erregerfrequenz weit weg von der Resonanzfrequenz (hier: mit einer „erzwungene“ Ruheenergie $E_0 = \sqrt{E^2 - p^2 \cdot c^2}$ des W-Teilchens weit weg von der „nominellen“ Ruheenergie $E_0 = m_W \cdot c^2$, bei der eine analoge „Resonanz“ liegt) ergibt sich für einen solchen Prozess eine sehr kleine Wahrscheinlichkeitsamplitude. Quantenmechanisch bedeutet dies, dass ein solches virtuelles W-Teilchen, das eine Energie E_0 weit weg von seiner Resonanz besitzt, sehr selten erzeugt werden kann. Aus diesem Grund findet die β -Umwandlung des Neutrons nur relativ selten statt und die mittlere Lebensdauer eines Neutrons beträgt ca. 15 Minuten. Aus demselben Grund geschieht die Kernfusion in Sternen, d. h. die Umwandlung von Protonen in Neutronen mithilfe der Bindungsenergie des entstehenden Heliums, extrem langsam, so dass unsere Sonne Milliarden Jahre lang brennen kann. Hätte das W-Teilchen z. B. nur eine halb so große Masse, wäre die Sonne längst ausgebrannt.

2.5.7 Ladungserhaltung

An jedem Vertex sind alle Ladungen jeweils erhalten. D. h. für jede der drei Ladungsarten gilt: Die Summe der Ladungen aller zum Vertex hinlaufenden Teilchen ist gleich der Summe der Ladungen aller vom Vertex weglaufenden Teilchen. Ein Feynman-Diagramm kann daher als Flussdiagramm für Ladungen gedeutet werden³⁷.

2.5.8 Reaktionswahrscheinlichkeiten

Feynman-Diagramme dienen nicht nur der graphischen Veranschaulichung von Wechselwirkungen zwischen Teilchen, sondern aus ihnen lässt sich auch die Wahrscheinlichkeit der beschriebenen Wechselwirkung (die sogenannte Reaktionswahrscheinlichkeit) ablesen:

Jeder Vertex trägt den Faktor $\alpha_i \cdot \text{Ladung}_1 \cdot \text{Ladung}_2$ zur Reaktionswahrscheinlichkeit bei.

Hierbei ist α_i der Kopplungsparameter der Wechselwirkung, die an dem entsprechenden Vertex stattfindet. Ladung_1 und Ladung_2 sind die zu der Wechselwirkung gehörenden Ladungszahlen bzw. Farbladungsvektoren der Anti-/Materieteilchen am Vertex, d. h.

$$\alpha_i \cdot \text{Ladung}_1 \cdot \text{Ladung}_2 = \alpha_{\text{em}} \cdot Z_1 \cdot Z_2$$

für die elektromagnetische Wechselwirkung,

$$\alpha_i \cdot \text{Ladung}_1 \cdot \text{Ladung}_2 = \alpha_W \cdot I_1 \cdot I_2$$

für die schwache Wechselwirkung und

$$\alpha_i \cdot \text{Ladung}_1 \cdot \text{Ladung}_2 = \alpha_s \cdot \vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2$$

für die starke Wechselwirkung.

Da die drei Kopplungsparameter alle vom Betrag kleiner als 1 sind, ist die Reaktionswahrscheinlichkeit eines Prozesses umso kleiner, je mehr Vertices das Feynman-Diagramm enthält. Wie häufig ein Wechselwirkungsprozess im Vergleich zu einem anderen ist, lässt sich ermitteln, indem man das Verhältnis der Reaktionswahrscheinlichkeiten der Prozesse bildet.

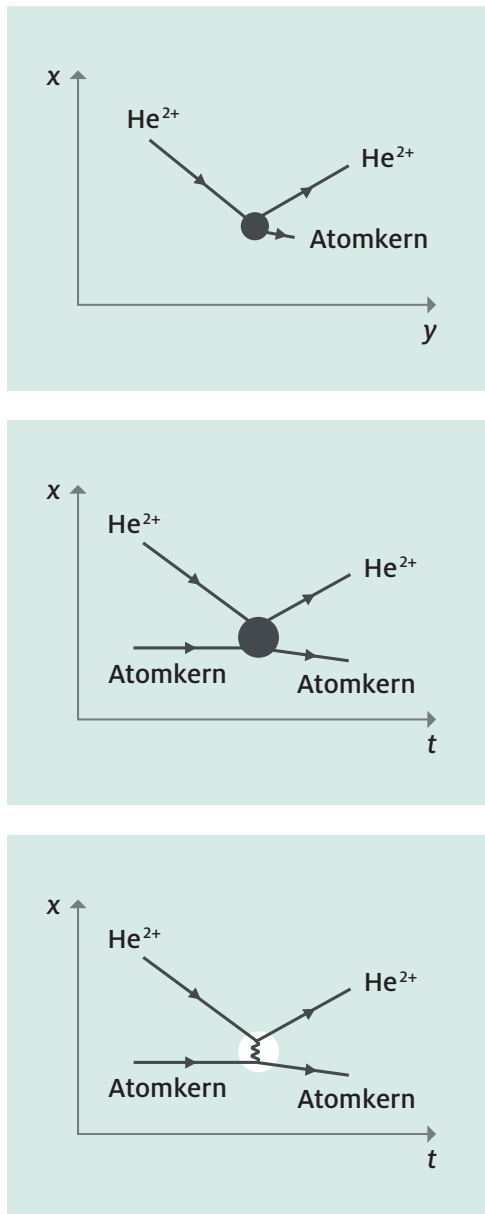


Abb. 43: Diagrammatische Darstellungen der Rutherford-Streuung. Oben: x - y -Diagramm; Mitte: Feynman-Diagramm mit Blackbox; Unten: Feynman-Diagramm mit detaillierter Darstellung des Wechselwirkungsprozesses

2.5.9 Beispielprozesse

Durch das Aneinanderfügen von Linien der verschiedenen Vertices aus Kapitel 2.5.1 erhält man neue Feynman-Diagramme, die kompliziertere Wechselwirkungen mehrerer Teilchen beschreiben. Es dürfen jedoch nur Linien gleichen Typs zusammengefügt werden. Fügt man durchgezogene Linien zusammen, so muss dabei eine durchgehende Pfeilrichtung entstehen. Im Folgenden werden vier Beispielprozesse vorgestellt.

Rutherford-Streuung

Als Rutherford-Streuung bezeichnet man die Streuung eines elektrisch geladenen Teilchens, z. B. eines Heliumkerns (He^{2+}), an einem ruhenden, elektrisch geladenen Streuzentrum wie etwa einem Atomkern. In Abb. 43 ist das x - y -Diagramm und die Feynman-Diagramme, welche diese Streuung beschreiben, auf verschiedene Weisen dargestellt.

Im oberen Diagramm ist der Streuprozess in der x - y -Ebene abgebildet: Ein sich in der x - y -Ebene von links nach rechts bewegendes Heliumkern wird an einem ruhenden Atomkern gestreut. Nach der Streuung bewegen sich der Heliumkern in eine andere Richtung und der Atomkern ein klein wenig nach rechts. Die Details des Streuprozesses sind hinter einer „Blackbox“ in Form einer schwarzen Kreisscheibe verborgen. In der mittleren Abbildung ist der Streuprozess in einem Feynman-Diagramm abgebildet: Da der Atomkern im Anfangszustand ruht, ist er im Feynman-Diagramm durch eine horizontale Linie dargestellt. Nach der Streuung bewegen sich der Heliumkern und der Atomkern vom Streuzentrum weg. Die Details der Wechselwirkung sind ebenfalls hinter einer Blackbox verborgen. In der unteren Abbildung ist der Streuprozess ebenfalls in einem Feynman-Diagramm abgebildet, wobei die Wechselwirkung durch den Austausch eines Photons explizit dargestellt ist: Der Heliumkern und der Atomkern sind jeweils elektrisch positiv geladen. Sie können daher miteinander über die elektromagnetische Wechselwirkung in Wechselwirkung treten, indem sie ein Photon

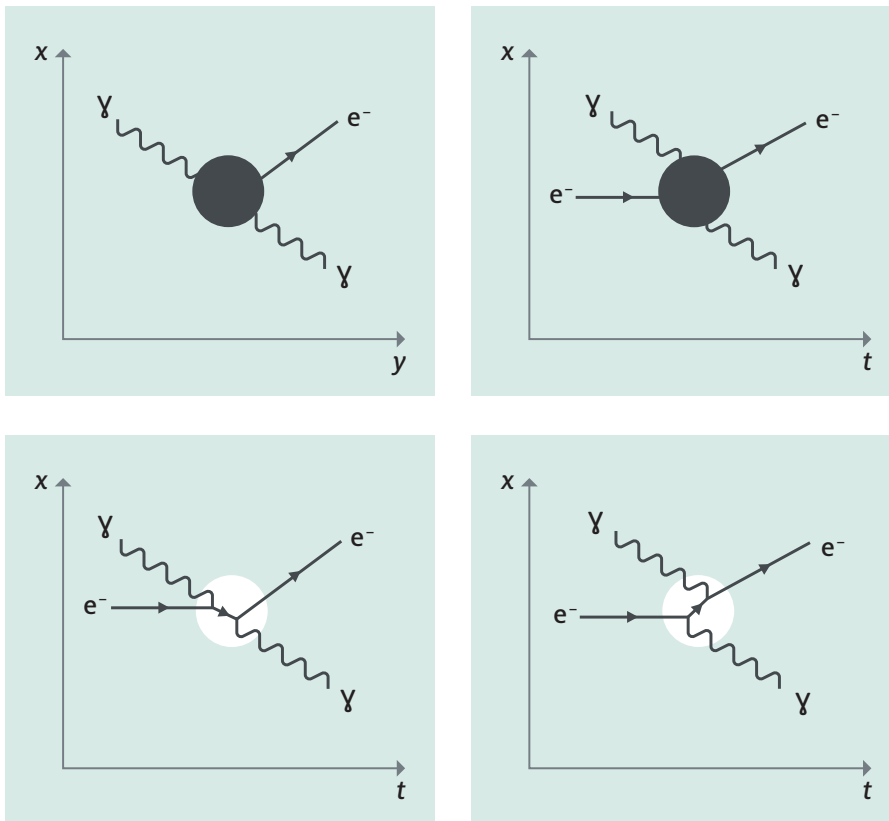


Abb. 44:
Diagrammatische
Darstellungen
der Compton-Streuung.
Oben links:
x-y-Diagramm;
Oben rechts:
Feynman-Diagramm
mit Blackbox;
Unten:
Feynman-Diagramme
mit detaillierter
Darstellung des Wechsel-
wirkungsprozesses.

austauschen. Das in Abb. 43 unten dargestellte Feynman-Diagramm erhält man, wenn man die Vertices aus Abb. 37 und Abb. 38 an der Photonlinie zusammenfügt. Die elektrischen Ladungen des Heliumkerns und des Atomkerns haben das gleiche Vorzeichen, daher führt die Wechselwirkung in diesem Fall zu abstoßenden Kräften. Da das Feynman-Diagramm zwei Vertices der elektromagnetischen Wechselwirkung enthält, und $Z_{\text{He}^{2+}} = +2$ beträgt, ist die Reaktionswahrscheinlichkeit dieses Prozesses proportional zu:

$$(\alpha_{\text{em}} \cdot Z_{\text{He}^{2+}} \cdot Z_{\text{Atomkern}})^2 = 4 \cdot Z_{\text{Atomkern}}^2 \cdot \alpha_{\text{em}}^2$$

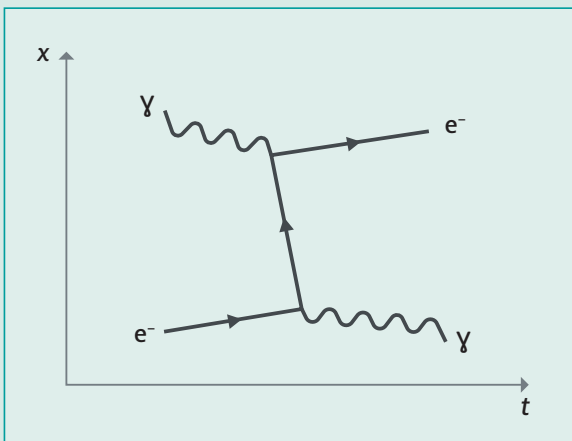
Compton-Streuung

Die Streuung eines Photons an einem Elektron bezeichnet man als Compton-Streuung. In Abb. 44 sind das x-y-Diagramm sowie die Feynman-Diagramme für die Compton-Streuung auf verschiedene Weisen dargestellt.

Im oberen linken Diagramm von Abb. 44 ist der Streuprozess in der x-y-Ebene dargestellt: Ein sich in der x-y-Ebene von links nach rechts bewegendes Photon wird an einem ruhenden Elektron gestreut. Nach der Streuung bewegen sich das Photon und das Elektron nach rechts. Die Details des Streuprozesses sind hinter einer Blackbox verborgen. In der oberen rechten Abbildung ist der Streuprozess in einem Feynman-Diagramm gezeigt: Da das Elektron im Anfangszustand ruht, ist es im Feynman-Diagramm durch eine horizontale Linie dargestellt. Nach der Streuung bewegen sich das Photon und das Elektron vom Streuzentrum weg. Die Details der Wechselwirkung sind ebenfalls hinter einer Blackbox verborgen. In den unteren beiden Abbildungen ist der detaillierte Streuprozess jeweils in einem Feynman-Diagramm abgebildet, wobei die Wechselwirkung des Photons mit dem Elektron explizit dargestellt ist. Diese beiden Feynman-Diagramme erhält man, wenn man die Vertices aus Abb. 37 und Abb. 38 an der Elektron-Linie zusammenfügt. Im linken Feynman-Diagramm trifft das

INFOKASTEN:**ÄQUIVALENTES FEYNMAN-DIAGRAMM
ZUR COMPTON-STREUUNG MIT UMGEKEHRTER
ZEITLICHER REIHENFOLGE DER IM INNEREN
ABLAUFENDEN PROZESSE**

Die zeitliche Reihenfolge der Vertices in einem Feynman-Diagramm ist nicht eindeutig festgelegt. Der in Abb. 44 unten rechts dargestellte Prozess der Compton-Streuung könnte daher auch wie in Abb. 45 dargestellt ablaufen:



In diesem äquivalenten Feynman-Diagramm entsteht aus dem einlaufenden Photon zunächst ein Elektron-Positron-Paar (Paarerzeugung). Das entstandene Positron annihiliert anschließend mit dem einlaufenden Elektron, wobei ein Photon entsteht (Paarvernichtung). Wenn man für das virtuelle

Teilchen eine positive Energie fordert, dann ist abhängig vom Bezugssystem nur eines der beiden äquivalenten Diagramme möglich. Je nach Wahl des Bezugssystems besitzt dann das auslaufende Elektron eine größere oder kleinere Energie als das einfallende Photon, und das virtuelle Teilchen muss als Elektron (Abb. 44 unten rechts) oder als Positron (Abb. 45) aufgefasst werden³⁹. Im Gebiet der Feynman-Diagramme innerhalb der weißen Kreise (z.B. in Abb. 44 unten) werden aus diesem Grund die x- und t-Achsen bedeutungslos. Es lassen sich weder zeitliche Reihenfolge noch örtliche Lage definieren, sondern ausschließlich Aussagen über Impulse und Energien treffen. Aus streng theoretischer Sicht stellen diese Bereiche die eigentlichen Feynman-Diagramme dar.

Abb. 45: Äquivalentes Feynman-Diagramm für die Compton-Streuung mit umgekehrter zeitlicher Reihenfolge des im Inneren ablaufenden Prozesses: Hier ist die Compton-Streuung eine Kombination aus Paarerzeugung (oberer Vertex) und Paarvernichtung (unterer Vertex).

Photon auf das Elektron, und wird von diesem vollständig absorbiert (Photon-Absorption, Abb. 38). Anschließend strahlt das Elektron ein neues Photon ab (Photon-Emission, Abb. 37). Im rechten Feynman-Diagramm sendet das Elektron zunächst ein

Photon aus (Photon-Emission, Abb. 37). Anschließend wird das einlaufende Photon von dem Elektron vollständig absorbiert (Photon-Absorption, Abb. 38). Beide Prozesse tragen in ähnlicher Weise zur Compton-Streuung bei³⁸.

³⁸ Eigentlich tragen in allen Prozessen unendlich viele Feynman-Diagramme zum Gesamtprozess bei. Hier werden allerdings ausschließlich die Diagramme mit der kleinsten Anzahl von Vertices betrachtet, da sie den dominanten Beitrag bilden (man nennt sie die Feynman-Diagramme der „führenden Ordnung“. In der Quantenelektrodynamik beispielsweise unterdrückt jeder weitere Vertex in einem Feynman-Diagramm den Beitrag des Diagramms zum Gesamtprozess um den Faktor $\alpha_{\text{em}} = \frac{1}{137}$). Die Comptonstreuung bildet insofern einen Sonderfall, da sie in führender Ordnung bereits zwei verschiedene Feynman-Diagramme besitzt.

³⁹ Daraus folgt, dass die numerische Auswertung der beiden äquivalenten Diagramme dasselbe Ergebnis liefert und nur eines der beiden Diagramme in die Berechnung der Prozesswahrscheinlichkeit einbezogen werden darf.

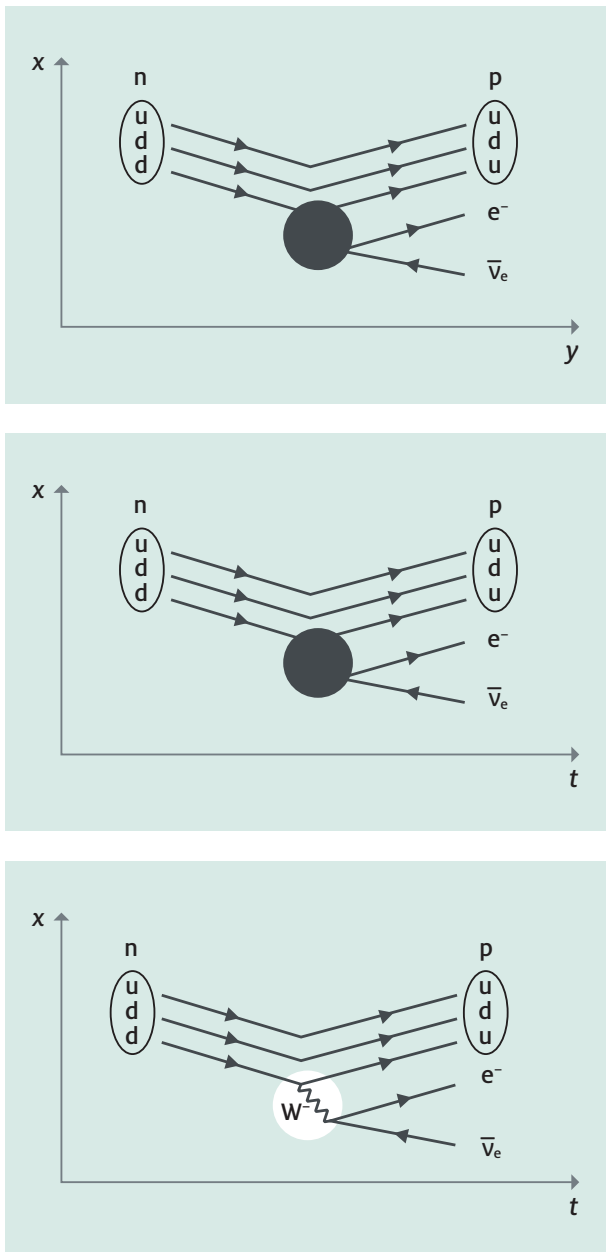


Abb. 46: Diagrammatische Darstellungen der β^- -Umwandlung des Neutrons. Oben: x-y-Diagramm; Mitte: Feynman-Diagramm mit Blackbox; Unten: Feynman-Diagramm mit detaillierter Darstellung des Wechselwirkungsprozesses

β^- -Umwandlungen

Beim β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino entstehen. Da das Elektron auch als β^- -Teilchen bezeichnet wird und bei dem Prozess Teilchenumwandlungen stattfinden, wird dieser Prozess auch β^- -Umwandlung genannt. In Abb. 46 ist das x-y-Diagramm sowie die Feynman-Diagramme, die die β^- -Umwandlung beschreiben, auf verschiedene Weisen dargestellt. Im oberen Diagramm ist die β^- -Umwandlung in der x-y-Ebene abgebildet: Eines der beiden Down-Quarks eines sich in der x-y-Ebene von links nach rechts bewegenden Neutrons wandelt sich in ein Up-Quark, ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino um. Nach der Umwandlung bewegen sich das so entstandene Proton, das Elektron und das Anti-Elektron-Neutrino nach rechts. Die Details des Streuprozesses sind hinter einer Blackbox verborgen. In der mittleren Abbildung ist die β^- -Umwandlung in einem Feynman-Diagramm abgebildet und der zeitliche Ablauf des Prozesses ist erkennbar. Die Details der Wechselwirkung sind ebenfalls hinter einer Blackbox verborgen.

In der unteren Abbildung ist die β^- -Umwandlung ebenfalls in einem Feynman-Diagramm visualisiert, wobei die stattfindenden Umwandlungsprozesse explizit dargestellt sind: Eines der beiden Down-Quarks aus dem Neutron emittiert eine W^- -Teilchen und wandelt sich dabei in ein Up-Quark um (W^- -Teilchen-Emission). Die beiden beteiligten Quarks befinden sich in einem gemeinsamen Duplett bezüglich der schwachen Ladung. Das W^- -Teilchen wandelt sich anschließend in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino um (Paarerzeugung). Hier ist daher das Anti-Teilchen beteiligt, das zum Elektron-Neutrino gehört, welches sich mit dem Elektron im selben Multipllett befindet.

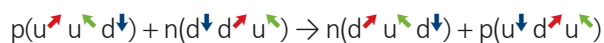
Der umgekehrte Prozess, bei dem sich ein Proton in ein Neutron umwandelt, ist ebenfalls möglich und wird β^+ -Umwandlung (auch: β^+ -Zerfall) genannt. Bei der β^+ -Umwandlung wandelt sich ein Up-Quark im Innern des Protons in ein Down-Quark um, wobei

ein W^+ -Teilchen entsteht. Dieses W^+ -Teilchen wandelt sich über Paarerzeugung anschließend in ein Positron und ein Elektron-Neutrino um. Die entsprechenden Diagramme der β^+ -Umwandlung sind in Abb. 47 dargestellt. Auch hier sind die bei der Emission des W^+ -Teilchens beteiligten Quarks in einem gemeinsamen Duplett bezüglich der schwachen Ladung, und es ist bei der anschließenden Paarerzeugung jeweils ein Materieteilchen (das Elektron-Neutrino) und ein zu einem Materieteilchen desselben Multipletts gehöriges Anti-Materieteilchen (das Positron) beteiligt.

Da das Neutron eine größere Masse als das Proton besitzt, ist die β^+ -Umwandlung für freie Protonen nicht möglich. Um den Prozess zu ermöglichen, muss Energie zugeführt werden, die z. B. – wie bei der Kernfusion in der Sonne – aus der Kernbindung resultieren kann.

Quark-Quark-Wechselwirkung

In Kapitel 2.3.3 wurde beschrieben, dass ein Proton mit einem Neutron wechselwirken kann, indem beispielsweise aus dem Proton das Up-Quark u^{\uparrow} mit dem Down-Quark d^{\downarrow} aus dem Neutron ausgetauscht wird:



Damit das Proton und das Neutron nach der Wechselwirkung wieder farbladungsneutral sind, müssen das Up-Quark u^{\uparrow} aus dem Proton in ein Up-Quark u^{\downarrow} und das Down-Quark d^{\downarrow} aus dem Neutron in ein Down-Quark d^{\uparrow} umgewandelt werden:



Solche Umwandlungen von Quarks unter Änderung der Farbladungsvektoren sind aufgrund der starken Wechselwirkung möglich und geschehen über den Austausch des Gluons g^{\uparrow} . Dieses Gluon besitzt einen Farbladungsvektor, der aus einem roten (\uparrow) und einem anti-blauen (\downarrow) Farbladungsvektor zusammengesetzt ist, siehe Abb. 48.

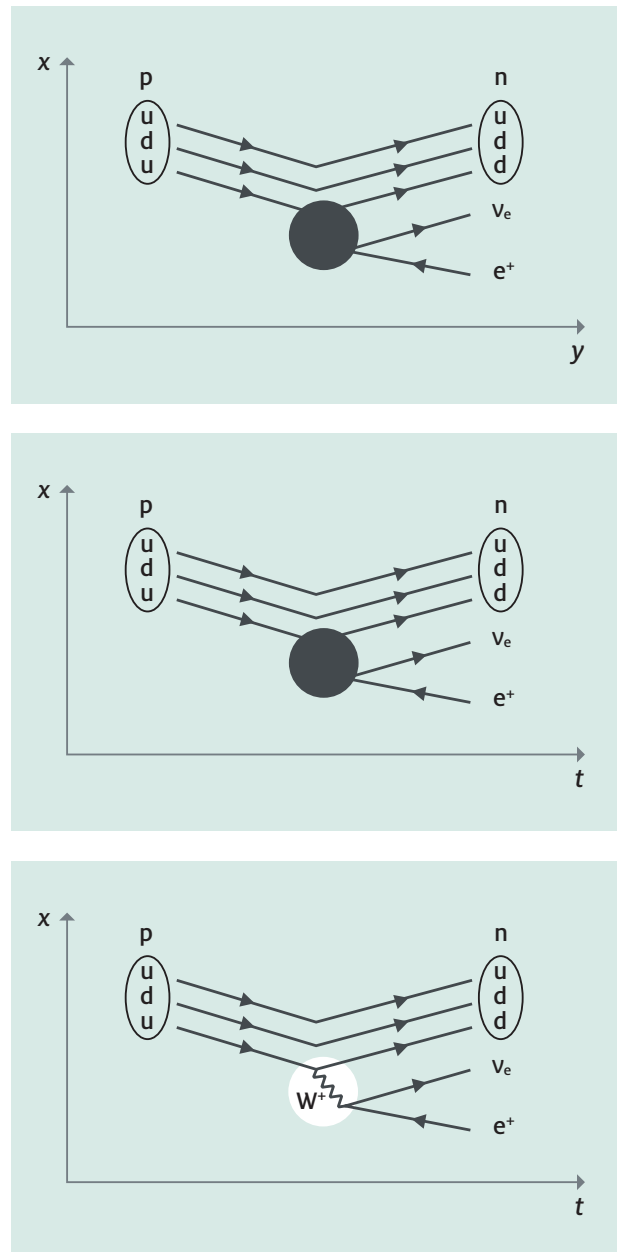


Abb. 47: Diagrammatische Darstellungen der β^+ -Umwandlung des Protons. Oben: x - y -Diagramm; Mitte: Feynman-Diagramm mit Blackbox; Unten: Feynman-Diagramm mit detaillierter Darstellung des Wechselwirkungsprozesses

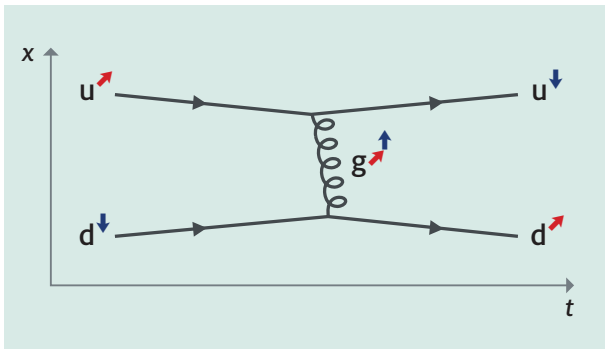


Abb. 48: Feynman-Diagramm des Austauschs von Farbladungsvektoren zwischen einem Up- und einem Down-Quark durch ein Gluon

Dieser Prozess ist ein Beispiel für Umwandlungen innerhalb von Farbtripletts der starken Ladung.

Gluon-Erzeugung

Ein Up-Quark und ein Anti-Up-Quark können sich aufgrund der starken Wechselwirkung in zwei reelle Gluonen umwandeln (Gluon-Erzeugung). Eine Umwandlung in nur ein reelles Gluon ist nicht möglich, da dabei Energie- und Impulserhaltung nicht gleichzeitig erfüllbar sind, analog zur Paarvernichtung in zwei Photonen. Das Feynman-Diagramm dieser Umwandlung ist in Abb. 49 dargestellt.

Da dieses Feynman-Diagramm zwei Vertices der starken Wechselwirkung enthält, ist die Reaktionswahrscheinlichkeit dieses Prozesses proportional zu

$$(\alpha_s \cdot \vec{C}_u \cdot \vec{C}_{\bar{u}})^2$$

Da der Kopplungsparameter der starken Wechselwirkung α_s größer ist als die Kopplungsparameter der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung, α_{em} und α_w , sind Prozesse, die aufgrund der starken Wechselwirkung ablaufen, d. h. Prozesse deren Feynman-Diagramm den Vertex der starken Wechselwirkung enthalten, häufiger als Prozesse, die aufgrund der elektromagnetischen oder der schwachen Wechselwirkung ablaufen.

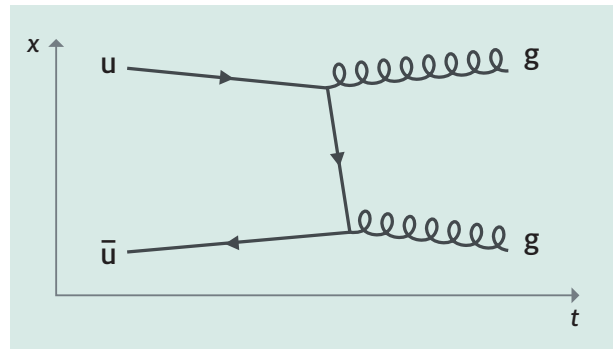


Abb. 49: Gluon-Erzeugung

Für Prozesse, deren Feynman-Diagramme analog sind, d. h. die sich nur in der Art der Vertices unterscheiden (z. B. Vertices unterschiedlicher Wechselwirkungen, wie stark, schwach, elektromagnetisch, oder Vertices unterschiedlicher Ladungszahlen für dieselbe Wechselwirkung), kann man sogar quantitativ die Verhältnisse der Reaktionswahrscheinlichkeiten berechnen. Dies funktioniert immer dann sehr gut, wenn genügend Energie vorhanden ist, dass mögliche Massenunterschiede der beteiligten Teilchen vernachlässigbar sind. Man kann beispielsweise die zu Abb. 49 analogen Feynman-Diagramme betrachten, bei denen paarweise Photonen bzw. Z-Teilchen anstatt Gluonen entstehen (siehe Abb. 50).

Damit auch Paare von schweren Z-Teilchen problemlos entstehen können, muss man die Quarks z. B. am LHC des CERN mit genügend hoher Energie bei genügend kleinen Abständen von 0,001 fm kollidieren lassen (was über den Umrechnungsfaktor $\hbar \cdot c = 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation Impulsüberträgen von 200 GeV entspricht). Bildet man für diese Paarproduktion von Gluonen, Photonen und Z-Teilchen die Verhältnisse der Reaktionswahrscheinlichkeiten, so erhält man mit den für die betrachteten Streuabstände von ca. 0,001 fm relevanten Werte von $\alpha_s \approx \frac{1}{10}$ und $\alpha_{em} \approx \frac{1}{127}$:

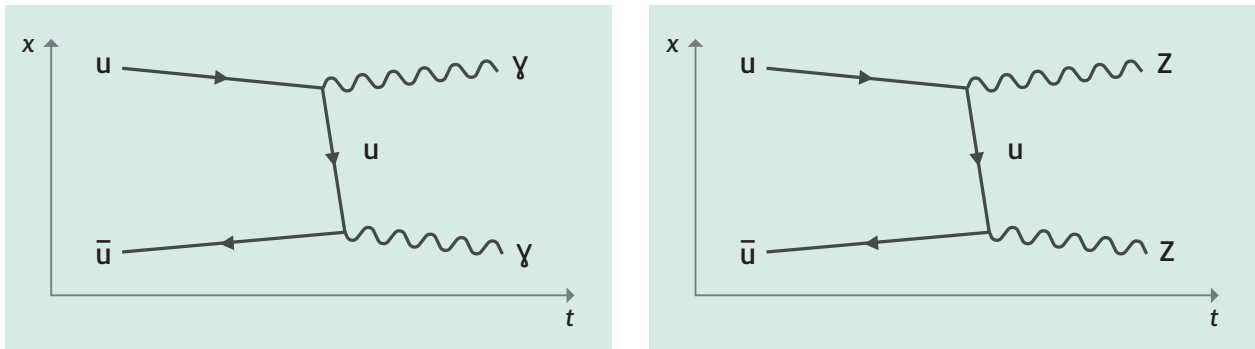


Abb. 50: Zu Abb. 49 analoge Feynman-Diagramme der Photon- (links) und Z-Erzeugung (rechts)

$$\frac{\alpha_s^2}{\alpha_{\text{em}}^2} = \frac{\left(\frac{1}{10}\right)^2}{\left(\frac{1}{127}\right)^2} \approx 160$$

$$\frac{\alpha_s^2}{\alpha_w^2} = \frac{\left(\frac{1}{10}\right)^2}{\left(\frac{1}{30}\right)^2} = 9.$$

In Kollisionen eines Up-Quarks (u) und eines Anti-Up-Quarks (\bar{u}) mit genügend hoher Energie sind daher Prozesse, deren Feynman-Diagramme zwei Vertices der starken Wechselwirkung enthalten, (Paarproduktion von Gluonen) grob geschätzt ca. 160-mal häufiger als Prozesse, deren Feynman-Diagramme zwei Vertices der elektromagnetischen Wechselwirkung enthalten (Paarproduktion von Photonen) und ca. 9-mal häufiger als Prozesse, deren Feynman-Diagramme zwei Vertices der schwachen Wechselwirkung enthalten (Paarproduktion von Z-Teilchen).

2.6 DAS VOLLSTÄNDIGE ORDNUNGSSCHEMA DER MATERIE-TEILCHEN

Die bisher diskutierten Materieteilchen umfassen das Elektron und das Elektron-Neutrino in der Gruppe der sogenannten Leptonen (griech.: die Leichten), und das Up- und das Down-Quark in der Gruppe der Quarks. Die Quarks bilden ihrerseits Protonen und Neutronen, die man als Baryonen (griech.: die Schweren) bezeichnet, die jedoch als zusammengesetzte Zustände keine Elementarteilchen sind. Gemäß ihrer beobachteten Umwandlungen ordnet das Standardmodell die Elementarteilchen in Multipletts in Bezug auf ihre elektromagnetische, schwache und starke Ladung. Zwischen 1936 und 2000 sind weitere, schwerere Quarks und Leptonen entdeckt worden, die als zusätzliche Generationen⁴⁰ ebenfalls in die Multipletts bezüglich der Ladungen des Standardmodells eingeordnet werden konnten.

Im Folgenden wird das Ordnungsschema der Elementarteilchen für drei Generationen von Materie- und Anti-Materieteilchen vervollständigt. Dabei werden beispielsweise die folgenden Fragen diskutiert: Wie definiert man die Teilchengenerationen? Sind Übergänge zwischen den Generationen möglich?

⁴⁰ Der Begriff der Teilchengeneration ist nicht im Sinne einer Hierarchie zu verstehen und nicht so zu interpretieren, dass die Teilchen höherer Generationen nach dem Urknall aus den Teilchen der ersten Generation entstanden sind.

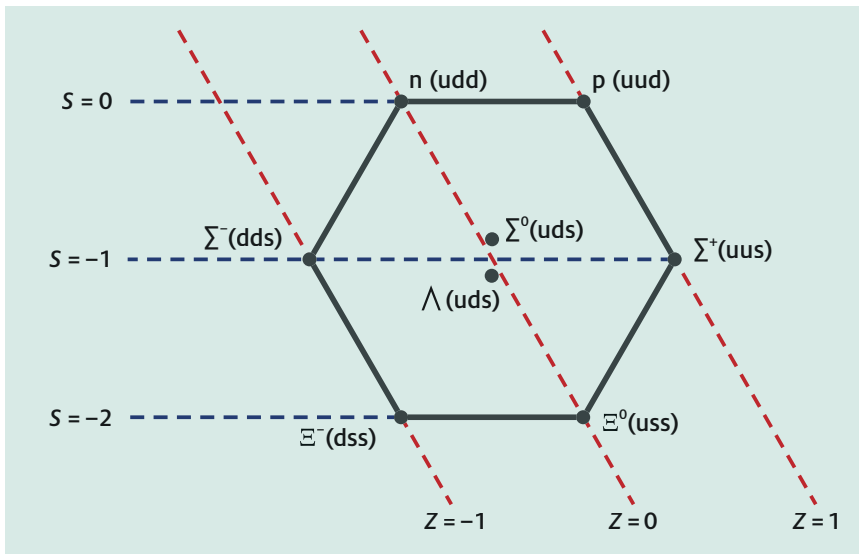


Abb. 51: Aus Up-, Down- und Strange-Quark zusammengesetzte Baryonen mit Spin $\frac{1}{2}$

2.6.1 Die drei Generationen der Materie- und Anti-Materieteilchen

Im Jahr 1936 entdeckten Carl D. Anderson und Seth Neddermeyer bei der Untersuchung kosmischer Strahlung ein neues Elementarteilchen, das Myon (μ). Es besitzt eine Masse von $m_\mu = 105,7 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, ist mit $Z_\mu = -1$ einfach elektrisch negativ geladen, besitzt eine schwache Ladungszahl von $I_\mu = -\frac{1}{2}$ und keine Farbladung. Das Myon hat also genau die gleichen Ladungen wie das Elektron. Es unterscheidet sich vom Elektron ausschließlich durch seine Masse, die ca. 200-mal größer ist, und kann daher als „schwerere Kopie“ des Elektrons bezeichnet werden. Im Jahr 1975 wurde noch ein weiteres Teilchen entdeckt, welches ebenfalls genau die gleichen Ladungen wie das Elektron und das Myon besitzt, jedoch mit einer weitaus größeren Masse: das Tauon (τ). Seine Masse beträgt $m_\tau = 1777 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, es ist somit mehr als zehnmals schwerer als das Myon und fast doppelt so schwer wie das Proton. Darüber hinaus wurden neben dem Elektron-Neutrino zwei weitere Neutrinos mit den gleichen Ladungen entdeckt: 1962 das Myon-Neutrino ν_μ und im Jahr 2000 das Tauon-Neutrino ν_τ .

In Blasenkammerexperimenten fand man in der Mitte des 20. Jahrhunderts einen ganzen „Zoo“ von Teilchen, die etwas schwerer als Proton und Neutron waren, und die man genau wie diese als Baryonen klassifizierte⁴¹. Diese „Kaskadenteilchen“ wandelten sich direkt oder in Stufen über weitere Teilchen in Protonen oder Neutronen um. Dafür, dass sie über die starke Wechselwirkung produziert wurden, war ihre Lebensdauer unerklärlich („seltsam“) lang, so dass sie in Nebel- und Blasenkammern sichtbare Flugstrecken von einigen Millimetern besaßen. Gell-Mann ordnete sie 1961 gemäß ihrer elektrischen Ladungszahl und der Zahl ihrer Umwandlungsstufen, die er „Seltsamkeit“ (S) nannte.

Für die Zustände Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- und Ξ^0 , Ξ^- ergab sich dabei das in Abb. 51 dargestellte „Baryonen-Oktett“, auf das sich auch der Titel der Veröffentlichung „The Eightfold Way“⁴² bezieht, angelehnt an den achtfachen Weg des Buddhismus zur Weisheit. Gell-Mann und Zweig fanden 1964 heraus, dass man dieses Oktett erklären könne, wenn alle Baryonen aus drei Bausteinen aufgebaut sind, die Gell-Mann Quarks nannte. Sie postulierten zwei leichte Quarks, das Up-Quark (u) mit $Z_u = +\frac{2}{3}$ und das Down-Quark (d) mit $Z_d = -\frac{1}{3}$, sowie ein etwas schwereres Strange-Quark (s) mit $Z_s = -\frac{1}{3}$. Da mit jeder Stufe

⁴¹ Mit dem Tauon existiert ein Lepton, das schwerer ist als alle diese Baryonen. Man ignoriert daher heute die ursprüngliche Bedeutung der Begriffe Lepton (leicht) und Baryon (schwer) und bezeichnet unabhängig von der Masse alle aus drei Quarks zusammengesetzten Teilchen als Baryonen. Ein elementares Materieteilchen, das kein Quark ist, heißt Lepton. Alle gebundenen Zustände aus einem Quark und einem Anti-Quark nennt man Meson (griech.: das Mittlere), obwohl insbesondere für Mesonen mit c - oder b -(Anti-)Quarks (siehe unten) auch hier wegen ihrer großen Masse die ursprüngliche Bedeutung verloren gegangen ist.

⁴² The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry, DOE Technical Report, March 15, 1961, http://www.osti.gov/accomplishments/display_biblio.jsp?id=ACC0113&numPages=52&fp=N.

$m_{\nu_e} < 0,000\,000\,1 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_{\nu_\mu} < 0,000\,000\,1 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_{\nu_\tau} < 0,000\,000\,1 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$m_e = 0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_\mu = 106 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_\tau = 1777 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$m_u \approx 2 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_c \approx 1300 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_t \approx 173\,000 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
$m_d \approx 5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_s \approx 100 \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_b \approx 4200 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

Tabelle 3: Die Massen der bekannten elementaren Materieteilchen

von Seltsamkeit die Masse der Baryonen um ähnliche Beträge zunahm, folgerten sie, dass der Betrag der Seltsamkeit die Anzahl der schwereren Strange-Quarks (s) angibt. So ergab sich die in Abb. 51 dargestellte Zuordnung der Quarks im Baryon-Oktett. Das Vorzeichen der auf der linken Seite in Abb. 51 aufgetragenen Seltsamkeit S wurde für diese Teilchen dabei willkürlich als negativ definiert. Mit der Einführung des Strange-Quarks als „schwere Kopie“ des Down-Quarks konnten neben diesem Baryonen-Oktett weitere – bis dahin unbekannte – Teilchen vorausgesagt und später experimentell nachgewiesen werden, an deren Bildung Strange-Quarks beteiligt sind.

Neben dem Strange-Quark wurden zwischen 1974 und 1994 noch drei weitere Quarks entdeckt: das Charm-Quark (c), das Bottom-Quark (b) und das Top-Quark (t). Das Charm- und das Top-Quark besitzen die gleichen Ladungen wie das Up-Quark, sind jedoch schwerer. Das Bottom-Quark hingegen besitzt die gleichen Ladungen wie das Down- und das Strange-Quark, ist jedoch ebenfalls schwerer. In Tabelle 3 wird ein Überblick über die Massen der elementaren Materieteilchen gegeben⁴³.

Nach der Entdeckung all dieser Teilchen, die jeweils „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos sind, ergab sich ein klares Bild vom Ordnungsschema der elementaren Materieteilchen: Von jedem der

leichten Materieteilchen (u, d, e⁻, ν_e) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.

Experimentell wurde festgestellt, dass sich jeweils zwei dieser Teilchen über die schwache Wechselwirkung (d. h. durch Emission oder Absorption eines W-Teilchens) ineinander umwandeln können, also Dupletts bezüglich der schwachen Ladung bilden. Anhand dieser experimentell gefundenen Dupletts wurden die Teilchen in sogenannte Teilchengenerationen (auch Familien genannt) geordnet. Teilchen, die sich in einem gemeinsamen Duplett befinden, ordnet man derselben Teilchengeneration zu. Quarks, die sich in einem gemeinsamen Tripletts bezüglich der starken Ladung befinden, werden ebenfalls derselben Generation zugeordnet. Die drei Generationen der elementaren Materieteilchen sind in Abb. 52 dargestellt.

Die Up- und Down-Quarks sowie das Elektron und das Elektron-Neutrino bilden die 1. Generation der Materieteilchen. Die 2. Generation umfasst das Charm- und das Strange-Quark sowie das Myon und das Myon-Neutrino. Die 3. Generation schließlich enthält das Top- und das Bottom-Quark sowie das Tauon und das Tauon-Neutrino. Teilchen gleicher Ladungen in verschiedenen Generationen unterscheiden sich nur in ihrer Masse. Wie in Kapitel 2.4.3 bereits beschrieben, bilden die Quarks in jeder Generation Dupletts bezüglich der schwachen Ladung (jeweils zwei in Abb. 52 übereinander

⁴³ Da Quarks nicht frei vorkommen, ist ihre Masse nicht eindeutig definierbar, was durch ein „≈“ symbolisiert wird. Aus Gründen der quantenmechanischen Zustandsmischung (siehe Fachliche Hinweise: Generationsübergreifende Teilchenumwandlungen) haben auch die Neutrinos keine feste Masse. Es lässt sich jedoch eine mittlere Masse definieren, für die hier nur eine experimentelle Obergrenze von $100 \frac{\text{meV}}{c^2}$ angegeben wird. Die Untergrenzen der mittleren Masse betragen $3 \frac{\text{meV}}{c^2}$ für ν_e und $30 \frac{\text{meV}}{c^2}$ für ν_μ und ν_τ.

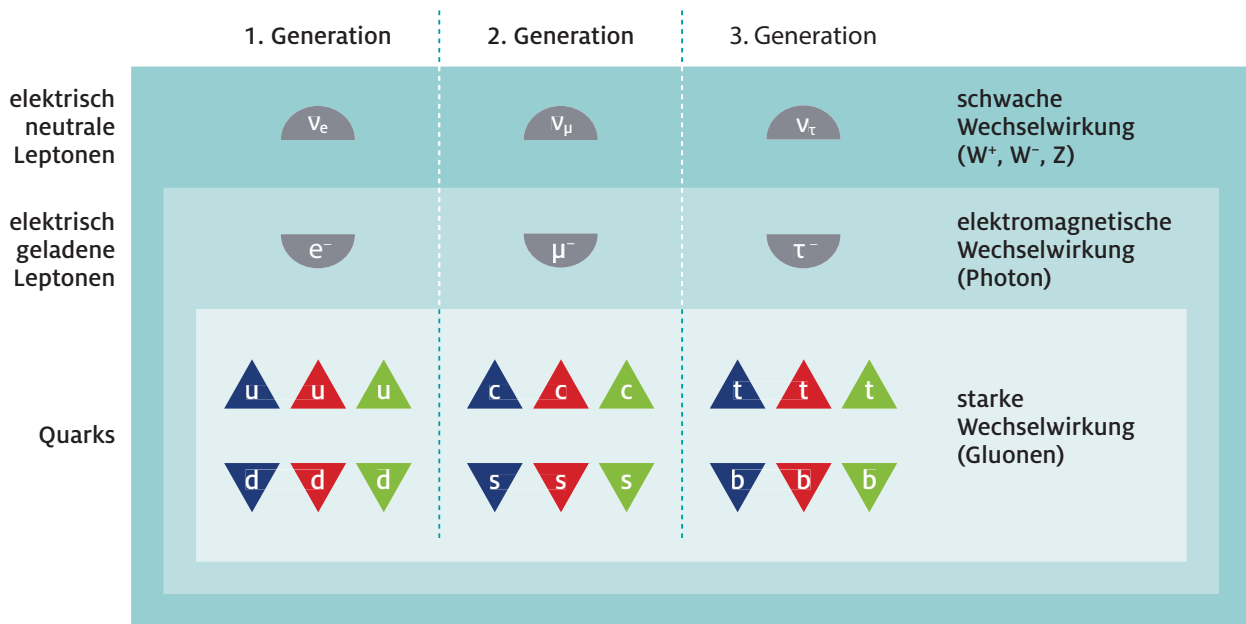


Abb. 52: Die drei Generationen der elementaren Materieteilchen

angeordnete Quarks gleicher Farbladung) und Triplets bezüglich der starken Ladung (jeweils drei in Abb. 52 nebeneinander angeordnete gleichartige Quarks unterschiedlicher Farbladung). Die beiden in Abb. 52 übereinander angeordneten Leptonen in jeder Generation bilden Dupletts bezüglich der schwachen und Singulets bezüglich der starken Ladung (d. h. sie besitzen keine starke Ladung). Bezüglich der elektromagnetischen Ladung bilden alle Teilchen Singulets. Jedes Teilchen befindet sich in genau einem Duplett der schwachen Ladung, kann also eindeutig einer Generation zugeordnet werden. Bei den Quarks ist die Zuordnung in die Triplets der starken Ladung ebenfalls eindeutig.

Die Definition der Teilchengenerationen über die Multipletts ist gleichbedeutend mit der Tatsache, dass über die Emission bzw. Absorption von Botenteilchen keine Umwandlungen zwischen Teilchen unterschiedlicher Generationen stattfinden, obwohl derartige Umwandlungen die Ladungserhaltung nicht verletzen würden⁴⁴.

Beispielsweise darf sich ein Myon über Emission oder Absorption eines W-Teilchens nicht in ein Neutrino eines anderen Dupletts umwandeln. Wie experimentell bestätigt ist, finden z. B. die beiden folgenden Umwandlungen nicht statt.

$$\mu^- \nrightarrow \nu_e + W^-$$

$$\mu^- + W^+ \nrightarrow \nu_\tau$$

Über Emission oder Absorption von ungeladenen Botenteilchen, also Photonen oder Z-Teilchen, kann infolgedessen überhaupt keine Teilchenumwandlung stattfinden, da diese nur zwischen Teilchen gleicher Ladungen möglich wäre. Materieteilchen mit gleichen Ladungen befinden sich aber jeweils in verschiedenen Generationen und damit in verschiedenen Multipletts. Zwar würde die Ladungserhaltung beispielsweise die nachfolgend dargestellt Umwandlung eines Myons μ^- in ein Elektron e^- unter Emission eines Photons γ erlauben, dieser Prozess findet jedoch nicht statt⁴⁵.

$$\mu^- \nrightarrow e^- + \gamma$$

⁴⁴ Seltene Umwandlungen zwischen Materieteilchen unterschiedlicher Generationen (z. B. vom Strange- zum Up-Quark oder die sogenannten Neutrinooszillationen) sind auf quantenmechanische Effekte von Zustandsmischungen zurückzuführen. Diese werden in den Fachlichen Hinweisen: Generationsübergreifende Teilchenumwandlungen diskutiert.

⁴⁵ Aus der Nicht-Beobachtung dieses Prozesses für mehrere Billionen untersuchter Myonen findet man experimentell, dass die Wahrscheinlichkeit dieser Umwandlung kleiner als $2 \cdot 10^{-12}$ ist.

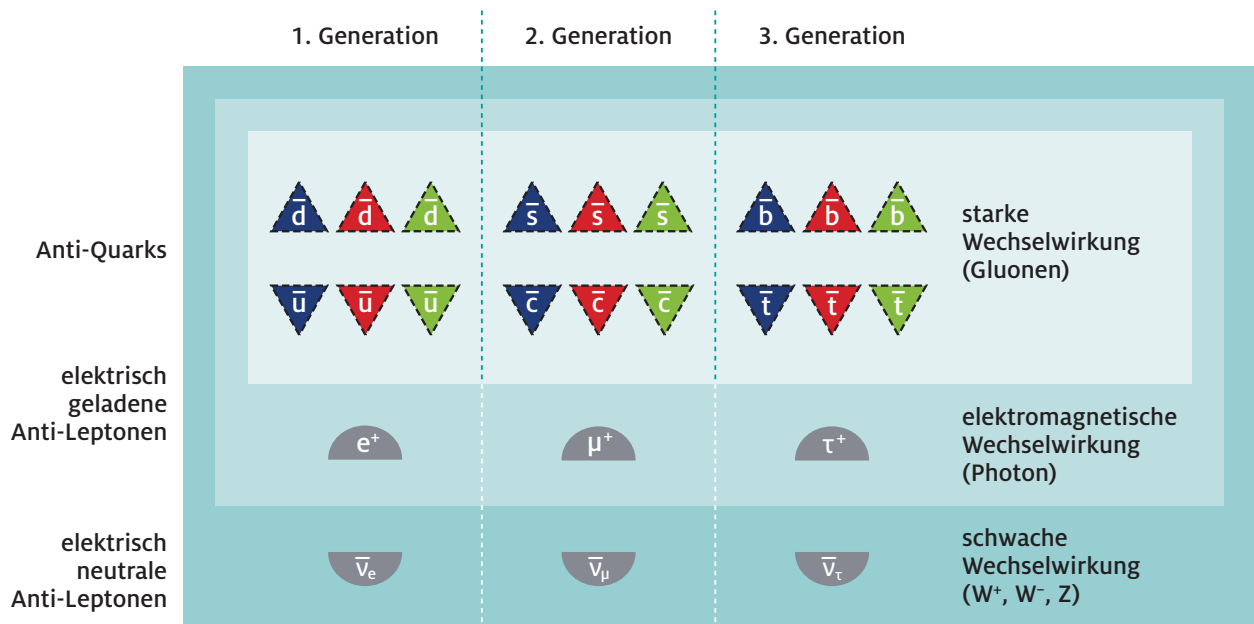


Abb. 54: Die drei Generationen der Anti-Materieteilchen

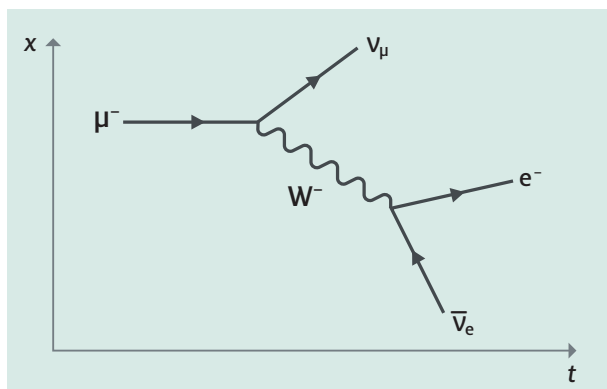


Abb. 53: Feynman-Diagramm der Myon-Umwandlung

Myon-Neutrino gehören beide zur zweiten Generation der Materieteilchen und bilden gemeinsam ein Duplett bezüglich der schwachen Ladung:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$$

Das entstandene W^- -Teilchen wandelt sich anschließend in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino um⁴⁷:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Es bleibt also auch bei mehreren Generationen dabei, dass alle Teilchen bezüglich der elektrischen Ladung Singulets bilden.

Dennoch existieren mehrstufige Prozesse, bei denen am Ende schließlich doch Teilchen einer anderen Generation vorliegen. Dabei muss stets mindestens ein Paarerzeugungs-Vertex vorhanden sein. Ein Beispiel dafür ist die Myon-Umwandlung (meist irreführend „Myon-Zerfall“ genannt). Das Feynman-Diagramm dieses mehrstufigen Prozesses ist in Abb. 53 dargestellt⁴⁶. Hier wandelt sich ein Myon aufgrund der schwachen Wechselwirkung durch Emission eines W^- -Teilchens in ein Myon-Neutrino um. Myon und

Zu jedem der entdeckten Teilchen gibt es ein zugehöriges Anti-Teilchen, welches die gleiche Masse wie das Teilchen, jedoch entgegengesetzte Ladungen besitzt. Daher lassen sich die Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen einordnen (siehe Abb. 54).

Aufgrund ihrer verschiedenen Ladungen unterliegen die Materieteilchen unterschiedlichen Wechselwirkungen, die in Abb. 52 und Abb. 54 durch farbige, ineinander verschachtelte Kästen dargestellt sind: Alle Materieteilchen unterliegen der schwachen Wechselwirkung und sind daher alle von einem dunkeltürkisen Kasten mit der Aufschrift „schwache

⁴⁶ Der Aufbau dieses Feynman-Diagramms entspricht, bis auf die bei der W^- -Emission beteiligten Materieteilchen, dem Diagramm der β^- -Umwandlung.

⁴⁷ Diese Paarzeugung ist die einzige unter einer Vielzahl möglicher Umwandlungen des W^- -Teilchens, die die Energieerhaltung aufgrund der zur Verfügung stehenden Ruheenergie des Myons erfüllt.

Wechselwirkung“ umrahmt. Die elektrisch geladenen Teilchen (Quarks, Elektron, Myon, Tauon) sowie ihre Anti-Teilchen unterliegen zusätzlich der elektromagnetischen Wechselwirkung, die durch einen mitteltürkisen Kasten dargestellt ist. Ausschließlich die Quarks und die Anti-Quarks unterliegen darüber hinaus der starken Wechselwirkung, da nur sie Farbladungsvektoren besitzen. Nur die Quarks und Anti-Quarks sind daher in den Abbildungen von einem helltürkisen Kasten umgeben.

Die Ordnung der Elementarteilchen nach ihren Ladungen und die Einordnung in drei Generationen ähnelt stark dem Periodensystem der Elemente (PSE) in der Chemie. Man erkennt die Analogie, wenn man Abb. 52 und Abb. 54 um jeweils 90 Grad im Uhrzeigersinn dreht. Im PSE sind Elemente mit ähnlichen chemischen Eigenschaften in den sogenannten Haupt- und Nebengruppen untereinander angeordnet. Im gedrehten Ordnungsschema der Elementarteilchen stehen immer Teilchen in einer Spalte untereinander, die in den Beträgen aller Ladungen übereinstimmen und daher gleich wechselwirken – bis auf Effekte, die durch ihre unterschiedlichen Massen bedingt sind. Im PSE nimmt die Atommasse der chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten zu. Analog dazu sind auch die Elementarteilchen in den um 90 Grad gedrehten Darstellungen so angeordnet, dass ihre Masse von oben nach unten zunimmt.

2.6.2 Übersicht über alle Teilchenladungen

Im Folgenden sollen noch einmal die Ladungen aller Elementarteilchen dargestellt werden. Die Anti-/Quarks werden durch farbige Dreiecke dargestellt, wobei die optische Farbe des Dreiecks dem Farbladungsvektor entspricht, den das jeweilige Anti-/Quark besitzt. Die Anti-Farbladungen sind durch eine gestrichelte schwarze Umrandung gekennzeichnet und durch einen Querstrich über dem Buchstaben. Ein blau dargestelltes Anti-Quark besitzt einen anti-blauen Farbladungsvektor. Gleiches gilt analog für rot und grün dargestellte Anti-Quarks. Besitzen die Anti-/Quarks eine positive schwache Ladung, zeigt ihre Spitze nach oben, bei negativer schwacher Ladung nach unten.

Die elektrisch geladenen Leptonen (Elektron, Myon, Tauon) und die elektrisch neutralen Leptonen (die drei Neutrinos) sowie ihre Anti-Teilchen werden als graue Halbkreisflächen dargestellt. Besitzen sie eine positive schwache Ladung, zeigt ihre Rundung nach oben, bei negativer schwacher Ladung nach unten. Das Photon ist als gelber Stern abgebildet und die W- und Z-Teilchen als gelbe Trapeze. Die acht Gluonen sind als Rhomben mit einem g im Zentrum dargestellt. Genau wie bei den Quarks sind die Anti-Farbladungen der Gluonen durch eine schwarz gestrichelte Umrandung gekennzeichnet. Das Higgs-Teilchen (s. Kapitel 2.7.1) besitzt in den Abbildungen die Form der unteren Hälfte eines Achtecks.

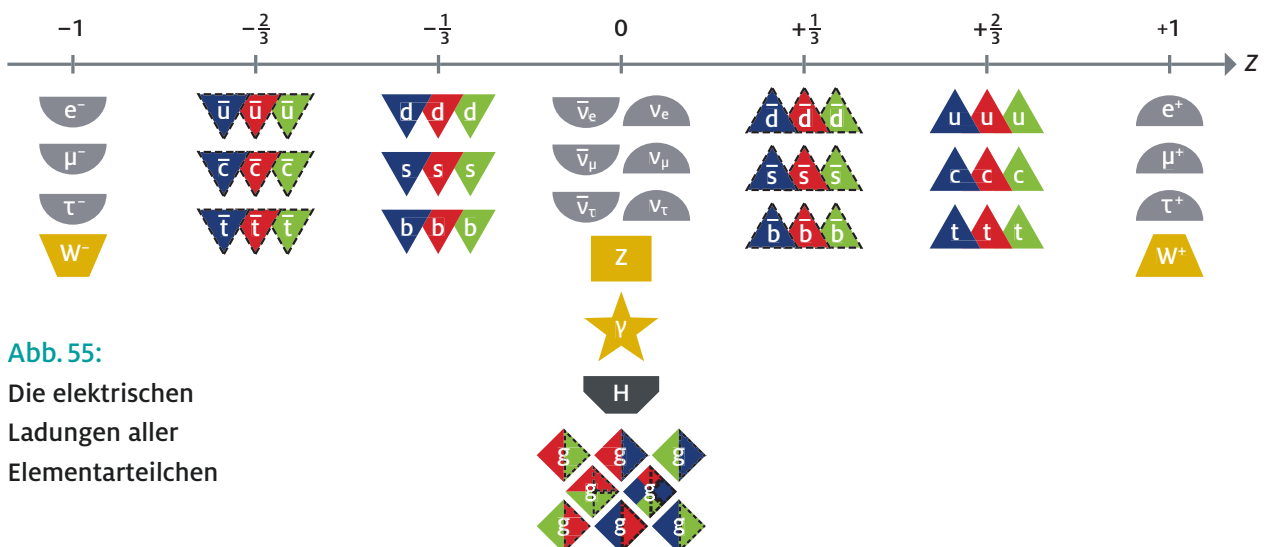


Abb. 55:
Die elektrischen
Ladungen aller
Elementarteilchen

Elektrische Ladung

Die elektrischen Ladungszahlen aller Elementarteilchen sind in Abb. 55 dargestellt.

Alle elektrischen Ladungszahlen sind ganzzahlige Vielfache von $\frac{1}{3}$. Alle Elementarteilchen, die eine elektrische Ladung ungleich Null besitzen, nehmen an der elektromagnetischen Wechselwirkung teil. Die elektrisch neutralen Elementarteilchen (die sechs Anti-/Neutrinos, die acht Gluonen, das Z-Teilchen, das Photon und das Higgs-Teilchen) wechselwirken hingegen nicht elektromagnetisch.

Schwache Ladung

Die schwachen Ladungszahlen aller Elementarteilchen sind in Abb. 56 aufgetragen. Alle Materieteilchen besitzen eine schwache Ladungszahl von $I = +\frac{1}{2}$ oder $I = -\frac{1}{2}$ und können daher schwach wechselwirken. Jeweils ein Paar aus Materieteilchen mit diesen beiden Ladungszahlen bildet bezüglich der schwachen Wechselwirkung ein Duplett.

Unter den Botenteilchen besitzen ausschließlich das W^- - und das W^+ -Teilchen eine von Null verschiedene schwache Ladungszahl. Das Z-Teilchen sowie das Photon und die acht Gluonen besitzen die schwache Ladungszahl Null und treten daher nicht mit anderen Teilchen über die schwache Wechselwirkung in Wechselwirkung. Das Higgs-Teilchen besitzt die schwache Ladungszahl $I_H = -\frac{1}{2}$. In den hier verwendeten Abbildungen und Darstellungen werden

Materieteilchen, die eine positive schwache Ladungszahl besitzen, mit der Spitze bzw. Rundung nach oben dargestellt. Deutet hingegen die Spitze oder Rundung nach unten, besitzt das jeweilige Materieteilchen eine negative schwache Ladungszahl.

Starke Ladung

Die Quarks, die Anti-Quarks und die Gluonen sind die einzigen bekannten Teilchen, die eine Farbladung, d. h. Farbladungsvektoren, besitzen. Die Farbladungsvektoren dieser Teilchen, d. h. die ihnen zugordneten Gitterpunkte auf dem Farbgitter, sind in Abb. 57 dargestellt. q steht dabei stellvertretend für alle Quarks und \bar{q} für alle Anti-Quarks.

Jedes der Quarks (u, d, c, s, t, b) kommt jeweils mit einem der drei verschiedenen Farbladungsvektoren \nearrow (rot), \searrow (grün), \downarrow (blau) vor. Entsprechend kommt jedes Anti-Quark ($\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b}$) jeweils mit einem der drei zu diesen Vektoren entgegengesetzten Farbladungsvektoren \nwarrow (anti-rot), \swarrow (anti-grün), \uparrow (anti-blau) vor. Die acht Gluonen besitzen jeweils eine Kombination dieser Farbladungsvektoren. Sechs der acht Gluonen besitzen einen Farbladungsvektor, der sich aus einer Farbe und einer Anti-Farbe zusammensetzt. Die verbleibenden beiden Gluonen besitzen keinen resultierenden Farbladungsvektor. Bei diesen Gluonen addieren sich Farben und Anti-Farben jeweils auf komplizierte Weise zum Nullvektor. Sie befinden sich demnach im Koordinatenursprung des Farbgitters.

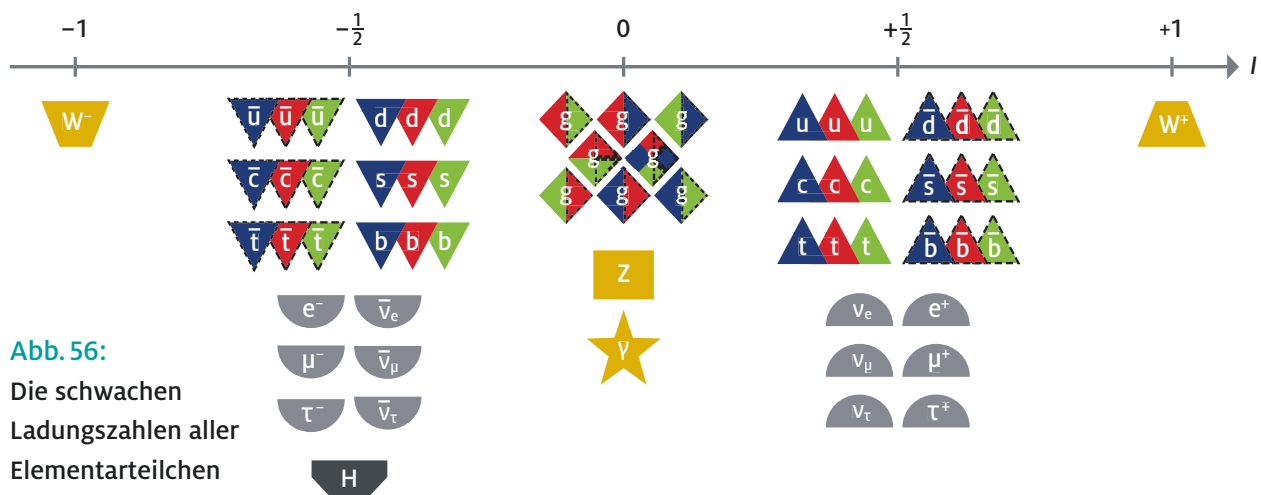


Abb. 56:

Die schwachen Ladungszahlen aller Elementarteilchen

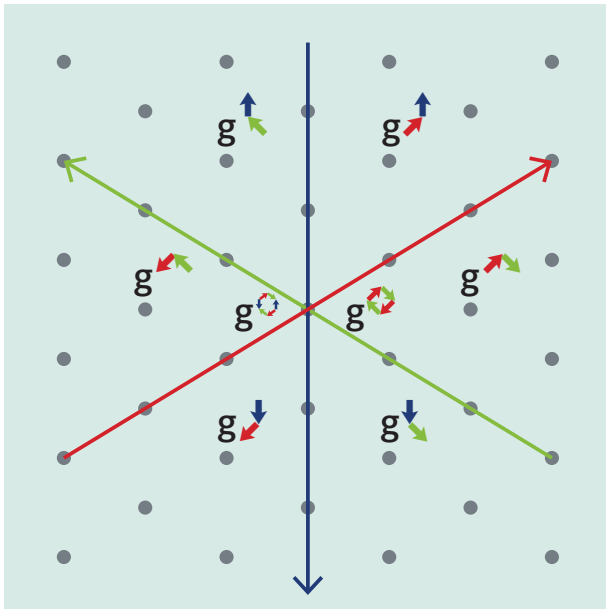
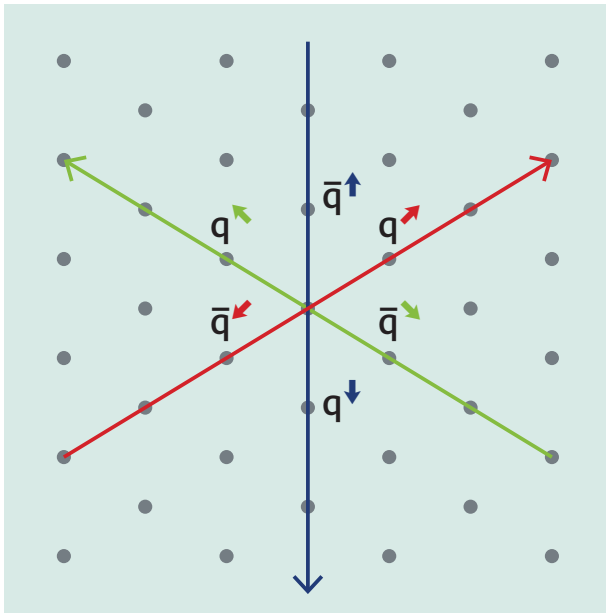


Abb. 57: Gitterpunkte der Quarks und Anti-Quarks (oben), sowie der Gluonen (unten) auf dem Farbgitter

2.7 DAS BROUT-ENGLERT-HIGGS-FELD

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt drei Wechselwirkungen: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. In Kapitel 2.4.3 wurde die Reichweite der schwachen Wechselwirkung im Teilchenbild mit der Masse der Botenteilchen (W^+ , W^- , Z) in Verbindung gebracht. Während im klassischen Bild die Feldlinien einer elektrischen Ladung bis ins Unendliche reichen können (Teilchenbild: unendliche Reichweite der Photonen⁴⁸), können schwache Ladungen Wechselwirkungen nur innerhalb eines sehr kurzen Abstandes von ca. 0,002 fm hervorrufen (Teilchenbild: endliche Reichweite der W^- und Z -Teilchen).

Diskutieren wir nun zunächst ein klassisches Analogon für endliche Reichweiten von Kräften, nämlich elektromagnetische Abschirmungen: Dielektrische Medien schirmen durch Polarisation elektrische Felder von Quell-Ladungen ab, während in diamagnetischen Substanzen unter Einwirkung eines magnetischen Feldes Kreisströme erzeugt werden, die dieses Magnetfeld abschirmen. Eine endliche Reichweite des Feldes einer Quell-Ladung (Teilchenbild: massebehaftete Botenteilchen) erreicht man also klassisch durch ein die Quell-Ladung umgebendes Medium, das verschiebbare Ladungen genau dieser abzuschirmenden Wechselwirkung enthält. Je leichter diese verschiebbar sind, umso besser ist die Abschirmung. So ist ein Supraleiter mit widerstandsfrei verschiebbaren elektrischen Ladungen (im Folgenden auch: elektrischer Supraleiter) ein idealer Diamagnet und ein ideales Dielektrikum.

Für die Abschirmung einer Quell-Ladung der schwachen Wechselwirkung führten 1964 Robert Brout, François Englert und Peter Higgs ein Feld ein, das man sich ebenfalls wie einen Supraleiter vorstellen kann, der das ganze Universum homogen durchdringt - allerdings ein Supraleiter für schwache Ladungen. Dieses Brout-Englert-Higgs-Feld (BEH-Feld) kann man sich in gewisser Hinsicht als

⁴⁸ Wenn Gluonen keine starke Farbladung besitzen und damit durch die Wechselwirkung untereinander die Feldlinien zu Schläuchen verengen würden, wäre auch für die starke Wechselwirkung die Reichweite unendlich, da Gluonen masselos sind.

„unendlichen See schwacher Ladungen“ vorstellen, der das gesamte Universum erfüllt. Im klassischen Bild schirmt dieser „See frei beweglicher schwacher Ladungen“ die Feldlinien von schwachen Quell-Ladungen bereits auf winzigen Distanzen von $\Delta x = 0,002 \text{ fm}$ ab (Teilchenbild: dieser See bewirkt, dass die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung, die W- und Z-Teilchen, eine Masse $m = \frac{\hbar \cdot c}{\Delta x \cdot c^2} \approx 100 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ besitzen⁴⁹). Die Abschirmung durch das BEH-Feld ist damit 10 Milliarden Mal effektiver als die eines elektrischen Supraleiters, dessen typische Abschirmlänge von elektromagnetischen Feldern ca. $20.000.000 \text{ fm} = 20 \text{ nm}$ beträgt.

Allerdings darf man sich das BEH-Feld keinesfalls als Medium vorstellen, das aus irgendetwas besteht und in dem sich die Bestandteile wie in einem Dielektrikum verschieben lassen: Quantenfeldtheoretisch ist das BEH-Feld ein Duplett-Feld $\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ bezüglich der schwachen Ladung, dessen untere Komponente die schwache Ladungszahl $I_{\phi^0} = -\frac{1}{2}$ und die elektrische Ladungszahl $Z_{\phi^0} = 0$ besitzt, während die obere Komponente die schwache Ladungszahl $I_{\phi^+} = +\frac{1}{2}$ und die elektrische Ladungszahl $Z_{\phi^+} = +1$ besitzt, ganz ähnlich wie z. B. beim Duplett aus Positron und Anti-Elektroneneutrino $\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$. Das Besondere am BEH-Feld ist, dass seine untere Komponente auch im Vakuum, d. h. wenn keinerlei Teilchen vorhanden sind, trotzdem einen von Null verschiedenen Wert besitzt: $\phi_{\text{Vakuum}} = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 246,221 \text{ GeV} \end{pmatrix}$. Der „See schwacher Ladungen“ ist also mathematisch so zu verstehen, dass die untere Feldkomponente des BEH-Feldes mit schwacher Ladungszahl $I_{\phi^0} = -\frac{1}{2}$ überall im Universum den endlichen Wert⁵⁰ $v = 246,221 \text{ GeV}$ besitzt.

2.7.1 Das Higgs-Teilchen und die Teilchenmassen

Wie erzeugt nun das BEH-Feld die Massen der Teilchen? In der Tat verläuft dies über zwei vollständig verschiedene Mechanismen, von denen der eine sehr gut verstanden, der andere jedoch noch unverstanden ist.

Die ursprüngliche Motivation zur Einführung des BEH-Feldes im Jahr 1964 bestand darin, die Massen (und somit die mittleren Reichweiten) der W- und Z-Teilchen zu erklären. Diese Botenteilchen koppeln mit der Kopplungsstärke $g_w = \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_w}$ an schwache Ladungen und somit auch an das BEH-Feld. Die Bewegung von W- und Z-Teilchen durch den überall vorhandenen „See schwacher Ladung“ hindert diese an der freien Ausbreitung und erzeugt so ihre Massen⁵¹.

Mathematisch ergeben sich zu g_w und v proportionale Massen der W- und Z-Teilchen⁵²:

$$m_w \cdot c^2 = \frac{1}{2} \cdot g_w \cdot v$$

$$m_z \cdot c^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{g_w}{\cos \theta_w} \cdot v$$

Der Wert $v = 246,221 \text{ GeV}$ der unteren Komponente des BEH-Feldes im Vakuum lässt sich sehr präzise aus der Myon-Umwandlung bestimmen, bei der die Masse der W-Teilchen und damit v eine zentrale Rolle spielt. Aus der Berechnung des Feynman-Diagramms in Abb. 53 ergibt sich eine zu v^4 proportionale mittlere Lebensdauer des Myons von $\tau_\mu = \frac{384 \cdot \pi^3 \cdot \hbar}{(m_\mu \cdot c^2)^5} \cdot v^4$.

Berechnet man zusätzlich noch g_w , z. B. aus der experimentell sehr präzise gemessenen Masse des Z-Teilchens, so stimmt die aus g_w und v gewonnene Vorhersage $m_w = 80,36 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ für die Masse des W-Teilchens mit einer Präzision von einem viertel Promill mit dem gemessenen Wert von $m_w = 80,38 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ überein. Dies ist eine großartige Errungen-

⁴⁹ Dieser Zusammenhang wurde in Kapitel 2.4.1 eingeführt. Δx entspricht der dort mit λ bezeichneten mittleren Reichweite der Botenteilchen.

⁵⁰ In der Fachliteratur wird dieser Wert „Vakuum-Erwartungswert“ des BEH-Feldes genannt.

⁵¹ Die Analogie des „Hinderns an der Ausbreitung“ ist nicht so zu verstehen ist, dass die W- und Z-Teilchen im Sinne von Reibung abgebremst werden.

⁵² In der Gleichung für die Masse des Z-Teilchens erscheint der Kosinus $\cos \theta_w$ des von Glashow eingeführten elektroschwachen Mischungswinkels θ_w (früher oft: Weinberg-Winkel), der sich wiederum aus den Verhältnissen der Kopplungsstärken der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung berechnen lässt.

schaft: Zum ersten Mal ist eine Theorie in der Lage, die Masse eines Elementarteilchens (des W-Teilchens) aus der Masse eines anderen Elementarteilchens (des Z-Teilchens) über deren bekannte Kopplung g_w an die schwache Ladung des BEH-Feldes vorherzusagen!

Anders verhält es sich mit den Materieteilchen. Steven Weinberg postulierte 1967, dass auch deren Massen durch Wechselwirkung mit dem BEH-Feld erzeugt werden können und dann ebenso proportional zu v sein sollten. Er führte für jedes Materie-

teilchen i einen individuellen (nicht herleitbaren) Kopplungsparameter, die so genannte Yukawa-Kopplung y_i , an das BEH-Feld ein. Z. B. gilt für das Elektron $y_e = 2,94 \cdot 10^{-6}$. Allgemein gilt für alle Massen der Materieteilchen $m_i \cdot c^2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot y_i \cdot v$. Es ist jedoch bis heute ungeklärt, wie genau eine solche Kopplung der Materieteilchen an das BEH-Feld von statten geht, und warum diese Yukawa-Kopplungen und damit die Massen der Materieteilchen so extrem unterschiedlich sind. Um ihre Massen durch das BEH-Feld zu erklären, müsste das Top-Quark 300.000-mal stärker und die Neutrinos mindestens 1.000.000-mal schwächer mit dem BEH-Feld wechselwirken als Elektronen. Dass dieses in der Tat zumindest für einige Materieteilchen der Fall ist, konnte inzwischen eindrucksvoll bestätigt werden, und zwar über das Higgs-Teilchen, wie im Folgenden dargelegt wird.

Jedes Feld in der Physik, ob klassisch oder quantenmechanisch, besitzt Anregungen. In einem Ferromagneten kann man z. B. Spinwellen erzeugen. Dies sind sich ausbreitende lokale Umordnungen oder Kreisbewegungen der Magnetisierung, die kleinste Quanten besitzen, sogenannte Magnonen. Auch das BEH-Feld besitzt gequantelte Anregungen, nämlich örtlich und zeitlich begrenzte Anregungen $H(\vec{r}, t)$ der unteren Komponente des BEH-Feldes $\phi = \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(\vec{r}, t) \end{pmatrix}^{53}$.

Diese Anregungen wurden ursprünglich von Peter Higgs diskutiert und heißen deshalb Higgs-Teilchen (H). Im Vergleich dazu besitzen alle anderen Felder, wie z. B. das Duplett aus Positron und Anti-Elektron-Neutrino im Vakuum den Wert $\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Higgs-Teilchen bilden den einzigen Zugang zur Untersuchung des BEH-Feldes und spielen für Teilchenphysiker zur Untersuchung des Massenmechanismus daher eine entscheidende Rolle. Ähnlich wie man von der uns umgebenden Luft meist nur dann etwas spürt, wenn sie lokal angeregt ist („Windböe“), ist das überall homogen vorhandene BEH-Feld an sich nicht nachweisbar. Erst wenn

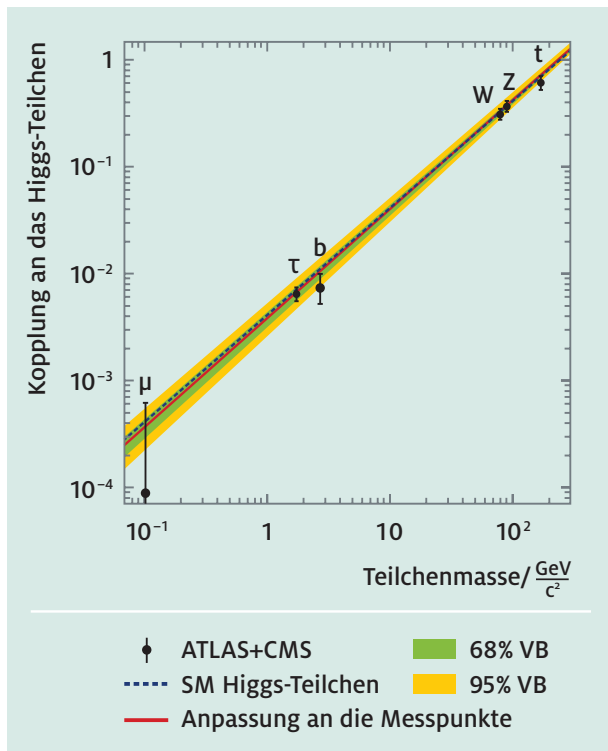


Abb. 58: Experimentelle Bestätigung, dass die Kopplungen verschiedener Teilchen an das Higgs-Teilchen tatsächlich proportional zu ihrer Masse sind. Für Materieteilchen zeigt die Ordinate ihre Yukawakopplung $\frac{y}{\sqrt{2}}$, für W- und Z-Teilchen ihre Kopplungsstärke $\frac{g_V}{2}$ ($V = W, Z$). Punkte mit Fehlerbalken sind Messungen, die blau gestrichelte Linie ist die Vorhersage des Standardmodells und die rote Linie die beste Anpassung an die Messpunkte, deren Vertrauensbereich als grünes (68 %) und gelbes (95 %) Band dargestellt ist.

(Quelle: geändert nach CERN 2016, ATLAS, CMS, Lizenz CC BY 2.0)

⁵³ Wie im nächsten Kapitel genauer dargelegt wird, würde eine Anregung der oberen Komponente keine Auswirkung auf die Energie des BEH-Feldes haben. Nur die Anregung der unteren Komponente ist mit einer Erhöhung der potenziellen Energie verbunden und daher physikalisch bedeutsam.

es lokal angeregt wird (d. h. man erzeugt eine kleine „Windböe“ im BEH-Feld, sprich ein Higgs-Teilchen), erhält man Einblick in die Eigenschaften des BEH-Feldes. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt vorher, dass die Higgs-Teilchen genau dieselben Kopplungen an Boten- und Materieteilchen besitzen wie das BEH-Feld selbst, da sie Anregungen des BEH-Feldes sind. Higgs-Teilchen wandeln sich nach sehr kurzer Zeit (ca. 10^{-22} s) in Paare aus Teilchen und Anti-Teilchen um.

Je stärker die Kopplung eines Teilchens an das Higgs-Teilchen ist, umso wahrscheinlicher entstehen aus der Umwandlung eines Higgs-Teilchens genau dieses Teilchen und sein Anti-Teilchen, woraus sich wiederum deren Kopplungen an das BEH-Feld berechnen lassen. Abb. 58 zeigt die so berechneten Kopplungen für alle bisher in Higgs-Umwandlungen beobachteten Teilchen. Es ergibt sich über mehr als drei Zehnerpotenzen genau der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Kopplung (Ordinate) und Teilchenmasse (Abszisse, in $\frac{\text{GeV}}{c^2}$) – zumindest, was die W- und Z-Teilchen sowie die beiden schwersten Leptonen (μ und τ) und die beiden schwersten Quarks (b und t) betrifft.

Alle anderen Materieteilchen konnte man noch nicht in Higgs-Umwandlungen beobachten, weil sie zu leicht sind und damit zu selten aus Higgs-Umwandlungen resultieren. Steven Weinberg hatte also Recht: Auch Anti-/Materieteilchen erhalten ihre Massen über Kopplungen an das BEH-Feld, auch wenn man (noch) nicht weiß, warum sie für die verschiedenen Teilchen so unterschiedliche Werte besitzen. Es wird daher spekuliert, dass sich hinter den Yukawa-Kopplungen eine tieferliegende, noch unbekannte Wechselwirkung (z. B. eine Substruktur des Higgs-Teilchens o. ä.) verbergen könnte.

2.7.2 Notwendigkeit und Entstehung des BEH-Feldes

Nach den vorherigen Abschnitten bleiben noch mehrere Fragen unbeantwortet: Warum ist es überhaupt erforderlich, dass ein spezieller Massen-

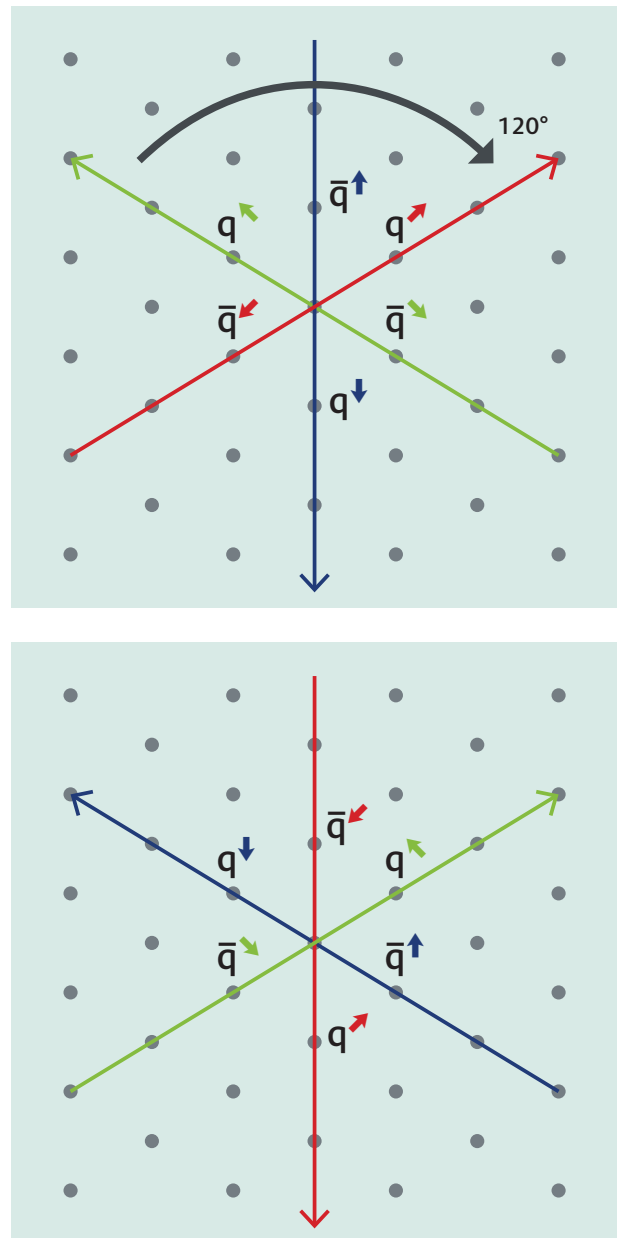


Abb. 59: Eine Drehung des Farbgitters um 120° ergibt eine identische Anordnung von Quarks, allerdings mit anderen Farbladungen. Denselben Effekt erhält man, wenn jedes der Quarks ein Gluon emittiert. So wird aus dem roten Quark q durch Emission eines rot-anti-grünen Gluons g ein grünes Quark q .

mechanismus die Massen der Teilchen erzeugt und warum können Elementarteilchen nicht einfach eine Masse als intrinsische charakteristische Eigenschaft besitzen, so wie sie Ladungen, Spin oder andere Quantenzahlen besitzen?

In der Tat wäre dies möglich, wenn es nur die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung geben würde. Nur die Theorie der schwachen Wechselwirkung hat Probleme mit Teilchenmassen, sowohl für die Botenteilchen, als auch für die Materieteilchen.

Die Eichsymmetrien des Standardmodells fordern die Unabhängigkeit der physikalischen Gesetze von „Eichtransformationen“ der Ladungen, z. B. also davon, welche der starken Ladungen man nun als „rot“, „grün“ oder „blau“ bezeichnet, oder was man positive und was negative schwache Ladung nennt. Die Eichsymmetrien des Standardmodells sind darüber hinaus sogar lokale Symmetrien, d. h. die physikalischen Grundgesetze erlauben Drehungen des Ladungs-Koordinatensystems an jedem Ort und zu jeder Zeit unabhängig voneinander. Man fordert, dass Umeichungen der Ladungen, die an jedem Ort und zu jeder Zeit anders durchgeführt werden können, nichts an den physikalischen Gesetzen ändern. Unter lokalen Umeichungen kann man sich Umwandlungen (Drehungen) innerhalb der Teilchenmultipletts vorstellen, also z. B. Drehungen der Achsen des Farbgitters. Abb. 59 zeigt schematisch, dass eine Eichtransformation (Beispiel: Rotation um 120°) im Raum der starken Ladung (Farbladungsgitter) denselben Effekt hat wie die Emission eines Gluons.

Man kann mathematisch streng herleiten, dass ohne Einführung lokaler Wechselwirkungen in Form von Botenteilchen (in unseren Beispielen Gluonen) eine lokale Eichsymmetrie für die Ladungen nicht erreichbar ist⁵⁴. Um solche Symmetrien zu erfüllen, muss die Natur also Wechselwirkungen über Botenteilchen (daher auch die Bezeichnung „Eichbosonen“) erlauben. Dies ist die grundlegende Erkenntnis des Standardmodells. Analog zum obigen Beispiel kann die Existenz der Botenteilchen der schwachen bzw. elektrischen Ladung also aus

Symmetrieoperationen in den entsprechenden Ladungsräumen hergeleitet werden. Dies bedeutet eine ungeheuer tiefe Einsicht in die Ordnung des Universums, deren philosophische Bedeutung man gerade erst anfängt zu diskutieren. Mathematisch kann man zeigen, dass Botenteilchen masselos sein müssen, um lokale Eichsymmetrien zu erhalten.

Außerdem verlangen sie, dass Teilchen, die sich in einem gemeinsamen Multiplett befinden, dieselbe Masse besitzen, wie z. B. bei der starken Ladung für $(u^{\uparrow}, u^{\downarrow}, u^{\leftarrow})$ und $(\bar{d}^{\uparrow}, \bar{d}^{\downarrow}, \bar{d}^{\leftarrow})$ oder bei der schwachen Ladung für $\begin{pmatrix} \bar{d}^{\uparrow} \\ \bar{u}^{\downarrow} \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$. Dies folgt daraus, dass man Teilchen innerhalb eines Multipletts durch die Ladungssymmetrien ineinander überführen kann. Dabei ändert sich außer der jeweiligen Ladung nichts (wobei eine Änderung der schwachen Ladung immer auch eine Änderung der elektrischen Ladung um denselben Betrag nach sich zieht). Die starke Wechselwirkung erfüllt problemlos ihre Ladungssymmetrie: Ihre Botenteilchen, die Gluonen, sind masselos, und Teilchen im selben Multiplett, wie das u^{\uparrow} , das u^{\downarrow} und das u^{\leftarrow} , besitzen alle dieselbe Masse. Bei der schwachen Wechselwirkung – und nur dort – ist beides hingegen nicht der Fall. Die W- und Z-Teilchen gehören zu den schwersten bekannten Elementarteilchen, und die Massen von Up- und Down-Quark sind z. B. um einen Faktor 2,5 bzw. die von Elektron und Elektron-Neutrino sogar mindestens um einen Faktor 1.000.000 verschieden.

Dass dies ein Problem darstellt, erkannte schon 1961 der „Vater“ der schwachen Wechselwirkung, Sheldon Glashow, der deshalb damals seine (inzwischen als richtig erkannte) Ladungssymmetrie der schwachen Ladung zur Erklärung der schwachen Wechselwirkung zunächst verwarf. Wenn man die erfolgreiche Beschreibung der schwachen Wechselwirkung retten möchte, muss man einen Mechanismus zur Massenerzeugung einführen, der die zugrundeliegende Ladungssymmetrie nicht vollständig zerstört. Dies haben Brout, Englert und Higgs 1964 erreicht, deren Ideen dann 1966-1967 von Kibble, Hagen, Guralnik, Salam und Weinberg weiterentwickelt wurden und zum heutigen Standardmodell der Teilchenphysik führten.

Die Besonderheit, dass eine vorhandene Symmetrie in den beobachtbaren Phänomenen nicht mehr sichtbar ist, tritt in der Physik in sehr vielen Gebieten auf, wie beispielsweise bei der Elastizität, bei der Supraleitung oder beim Ferromagnetismus: Man nennt es „spontane Symmetriebrechung“⁵⁵, obwohl die Symmetrie eigentlich nicht gebrochen, sondern nur „versteckt“ ist.

Als Analogie kann man das Beispiel eines elastischen Nagels heranziehen, auf den man von oben eine Kraft F ausübt: Bei einer sehr kleinen Kraft F sind sowohl der Nagel als auch seine potenzielle Energie räumlich rotationssymmetrisch um die Achse des Nagels. Eine Verbiegung des Nagels würde Energie erfordern; das Minimum der potenziellen Energie seiner Verbiegung ist daher bei Null (Abb. 60, links). Oberhalb einer „kritischen Kraft“ $F > F_{\text{krit}}$ stellt sich eine (permanente) Verbiegung in eine zufällige Richtung ein (Abb. 60, rechts). Die Rotationssymmetrie des Nagels ist gebrochen, obwohl seine potenzielle Energie immer noch rotationssymmetrisch ist. Der nicht-symmetrische Zustand des Nagels „versteckt“ die immer noch vorhandene Symmetrie der potenziellen Energie.

Ein weiteres Beispiel ist der Ferromagnetismus. Oberhalb der Curie-Temperatur $T_c \approx 1000 \text{ K}$ besitzt ein Ferromagnet keine Magnetisierung, denn die einzelnen magnetischen Momente der Elementarmagneten zeigen in zufällig verteilte Richtungen (siehe Abb. 61, rechts).

Die Wärmebewegung der einzelnen magnetischen Momente überwiegt die Wechselwirkung der Elementarmagneten untereinander, so dass sie sich nicht ausrichten können. Diesen Zustand des Ferromagneten bezeichnet man als räumlich rotationssymmetrisch, da keine Magnetisierungsrichtung ausgezeichnet ist. Kühlt man den Ferromagneten auf eine Temperatur unterhalb der Curie-Temperatur ab, so bildet sich spontan eine

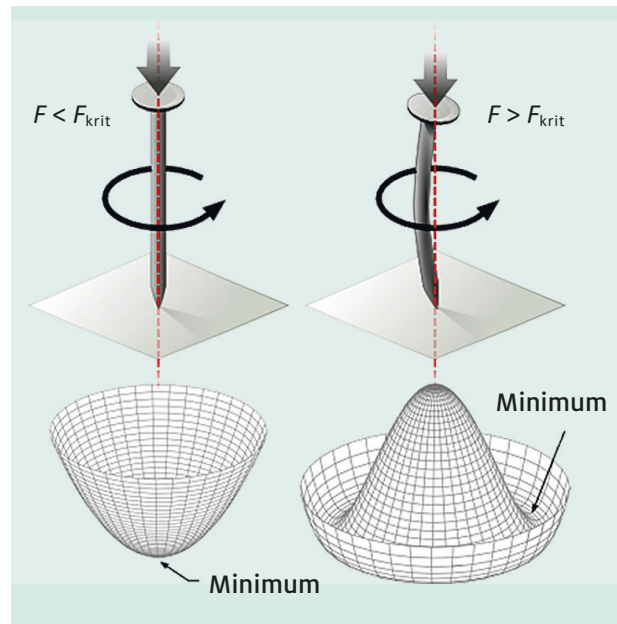


Abb. 60: Spontane Symmetriebrechung bei einem elastischen Nagel. Oben: Der beobachtete Zustand ist links rotationssymmetrisch, rechts jedoch nicht mehr. Unten: Die potenzielle Energie bleibt in beiden Fällen rotationssymmetrisch.

(verändert nach: Frédéric Bellaïche, <http://quantum-bits.org/?p=233>)

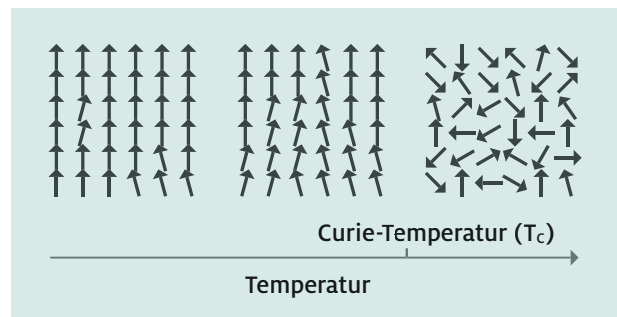


Abb. 61: Brechung der Rotationssymmetrie eines Ferromagneten in Abhängigkeit der Temperatur

Magnetisierung dadurch aus, dass sich alle magnetischen Momente der Elementarmagneten in eine sich zufällig ergebende Richtung ausrichten (Abb. 61, links). In diesem Zustand sieht es so aus, als sei die Rotationssymmetrie des Ferromagneten gebrochen, da nun eine Richtung durch die

⁵⁵ Eine Symmetriebrechung wird als „spontan“ bezeichnet, wenn der Grundzustand des physikalischen Systems die Symmetrie verletzt (wie z.B. der von Null verschiedene Grundzustand des BEH-Feldes, der die schwache Ladungssymmetrie verletzt), die Grundgleichungen des Systems hingegen weiterhin die Symmetrie erfüllen. Für die Einführung dieses Konzeptes in die Teilchenphysik erhielt Yoichiri Nambu 2008 den Nobelpreis: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/nambu-facts.html.

Magnetisierung ausgezeichnet ist. In Wahrheit ist die Rotationssymmetrie aber immer noch vorhanden (d. h. sie ist „versteckt“), denn man kann den gesamten Ferromagneten ohne Energieaufwand in eine beliebige andere Richtung drehen.

Ganz ähnlich stellt man sich die Entstehung des heutigen Wertes des BEH-Feldes während der Abkühlung des Universums vor. Bis ungefähr eine Billionstel Sekunde nach dem Urknall besaßen alle Teilchen bei einer Temperatur von $T > 2,7 \cdot 10^{15} \text{ K}$ (was etwa dem 200-millionenfachen der Temperatur im Zentrum der Sonne entspricht) eine Bewegungsenergie von $E_{\text{kin}} = k_B \cdot T > 246 \text{ GeV}$. Ähnlich, wie eine hohe Temperatur bei einem Ferromagneten zu einer Gesamtmagnetisierung von Null führt, weil die Wärmebewegung verhindert, dass sich alle Elementarmagneten in eine gemeinsame Richtung ausrichten, so verhindern hohe Temperaturen oberhalb $T_{\text{EW}} = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ K}$ eine „Kondensation“⁵⁶ des BEH-Feldes auf einen von Null verschiedenen Wert. Nach der ersten Billionstel Sekunde nach dem Urknall war deshalb noch $\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ und somit alle Teilchen masselos. Im Folgenden änderte sich durch Abkühlung die potenzielle Energie $V(\phi)$ des Higgs-Feldes, von der Form in Abb. 60, unten links in die Form der Abb. 60, unten rechts.

Im Unterschied zum elastischen Nagel oder Ferromagneten sind die für das BEH-Feld relevanten Koordinatenachsen keine räumlichen Achsen, sondern sie beschreiben die Werte der unteren und oberen Komponente im Duplett-BEH-Feld $\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$, d. h. im „Raum der schwachen Ladung“. Der räumlichen Rotationssymmetrie beim elastischen Nagel oder Ferromagneten entspricht im Falle des BEH-Feldes also einer Rotationssymmetrie für die schwache Ladung von $I = -\frac{1}{2}$ (untere Komponente) zu $I = +\frac{1}{2}$ (obere Komponente), wie in Abb. 62 dargestellt. Dies ist die o. g. grundlegende (Eich-) Symmetrie der schwachen Wechselwirkung.

Als das Universum sich auf eine Temperatur unterhalb T_{EW} abgekühlt hatte, bildete sich spontan durch „Kondensation“ ein Wert von $\phi^0 = v = 246 \text{ GeV}$ in der unteren, elektrisch neutralen Komponente des BEH-Feldes aus. Genau wie beim Ferromagneten sieht es nun so aus, als sei die Rotationssymmetrie in diesem Zustand gebrochen, da eine Komponente des BEH-Feldes ausgezeichnet ist. In Wahrheit ist die Rotationssymmetrie aber immer noch vorhanden („versteckt“), denn man könnte den Zustand des BEH-Feldes (symbolisiert durch die Kugel im Tal der potenziellen Energie des BEH-Felds in Abb. 62) ohne Energieaufwand entlang des Kreises mit $|\phi| = v$ in eine beliebige andere Koordinatenrichtung drehen. Das rettet die Theorie von Sheldon Glashow für die schwache Wechselwirkung. Die Symmetrie ist noch vorhanden, nur der Grundzustand unseres Universums erfüllt sie nicht mehr.

In Abb. 62 lässt sich außerdem die Erzeugung eines Higgs-Teilchens $H(\vec{r}, t)$ veranschaulichen. Sie ist eine irgendwo lokal im Universum (z. B. durch Teilchenkollision im LHC oder in der Erdatmosphäre) hervorgerufene Anregung des BEH-Feldes entlang der Koordinatenachse ϕ^0 . Das Hervorrufen einer Anregung erfordert Energie, denn entlang der ϕ^0 -Achse geht es in der potenziellen Energie in jedem Fall „bergauf“. Die Steilheit des Anstiegs der potenziellen Energie des BEH-Feldes $V(\phi) = \frac{\lambda}{4} (|\phi|^4 - 2v^2 \cdot |\phi|^2)$ legt fest, wie schwierig eine Änderung des Wertes des BEH-Feldes zu bewerkstelligen ist und wird durch die Naturkonstante λ charakterisiert. Sie beschreibt anschaulich die „Zähigkeit“ des BEH-Feldes gegenüber Änderungen seines Wertes und damit, welche Energie zur Erzeugung eines Higgs-Teilchens erforderlich ist⁵⁷. Die Theorie liefert für die oben dargestellte potenzielle Energie den Zusammenhang $m_H \cdot c^2 = \sqrt{2 \cdot \lambda} \cdot v$ zwischen Zähigkeit λ des BEH-Feldes und der Masse des Higgs-Teilchens. Getrennt voneinander kann die Theorie diese

⁵⁶ Es handelt sich bei der Ausbildung des von Null verschiedenen Wertes des BEH-Feldes tatsächlich um einen Phasenübergang des gesamten Universums, ähnlich der Kondensation von Wasserdampf zu flüssigem Wasser.

⁵⁷ Interessanterweise hatte die potenzielle Energie des BEH-Feldes eine Billionstel Sekunde nach dem Urknall, als die Symmetrie noch nicht spontan gebrochen war (d. h. $v = 0$), ebenfalls eine (bisher unbekannte) positive Steigung rund um das Minimum, etwa so wie in Abb. 60 unten links. Diese auch schon vor der Symmetriebrechung ($v = 0$) vorhandene Zähigkeit des BEH-Feldes bedeutet, dass Higgs-Teilchen – im Gegensatz zu allen anderen Teilchen – auch bei ungebrochener Symmetrie von Null verschiedene Massen besitzen können. Auch bei ungebrochener Symmetrie sind diese proportional zur Wurzel des Vorfaktors des $|\phi|^2$ -Terms im Potenzial $V(\phi)$.

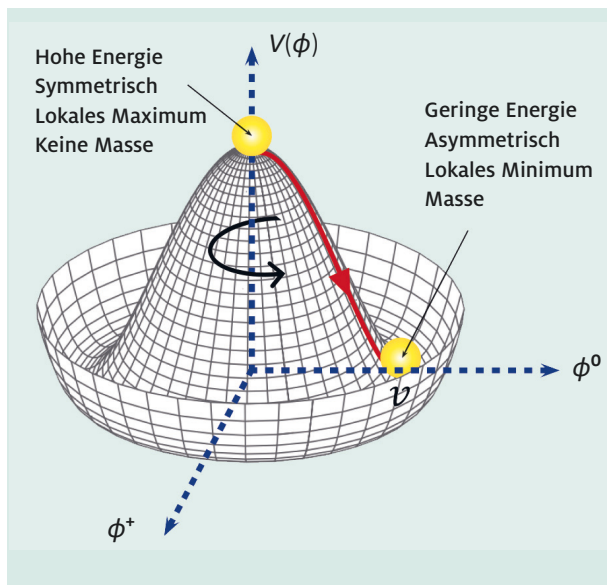


Abb. 62: Potenzielle Energie des BEH-Feldes nach der „spontanen Symmetriebrechung“ als Funktion der Werte seiner oberen und unteren Komponenten. Das Minimum der potenziellen Energie liegt auf einem Kreis mit $|\phi| = v$. Der beobachtete Zustand $\phi^0 = v$ zeichnet die untere Komponente des BEH-Feldes aus, obwohl die potenzielle Energie in Bezug auf die beiden Komponenten des Duplett-Feldes immer noch rotationssymmetrisch ist.

(verändert nach Frédéric Bellaïche, <http://www.quantum-bits.org/?p=233>)

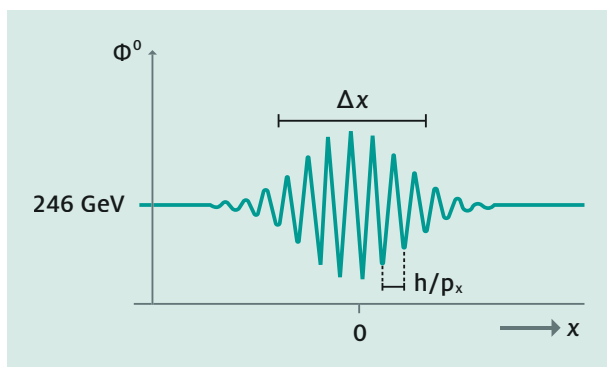


Abb. 63: Amplitude der örtlichen Anregung des BEH-Feldes in Form eines Higgs-Teilchens (qualitativ). p_x ist dabei der Impuls des Higgs-Teilchens in x -Richtung.

Größen jedoch nicht vorhersagen. Erst aus der Messung der Masse des Higgs-Teilchens $m_H = 125,1 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ konnte der bereits sehr genaue Wert $\lambda = 0,129$ ermittelt werden⁵⁸.

Aus dem Wert der Higgs-Teilchen-Masse lässt sich außerdem folgern, dass sich Anregungen des BEH-Feldes nur in einem winzigen Raumvolumen der Ausdehnung $\Delta x = \frac{\hbar \cdot c}{m_H \cdot c^2} \approx 0,0016 \text{ fm}$ abspielen können (siehe Abb. 63).

Die Tatsache, dass der heutige Zustand des Universums nicht mehr die grundlegende Ladungs-Symmetrie der schwachen Wechselwirkung erfüllt, weil der Wert des BEH-Feldes in seiner unteren Komponente genau diese Symmetrie spontan bricht, hat eine wichtige Konsequenz: Der Erhaltungssatz der schwachen Ladung gilt bei Prozessen, in denen das BEH-Feld oder Higgs-Teilchen involviert sind, nicht mehr⁵⁹. Dies sieht man z. B. an den Umwandlungen des Higgs-Teilchens H , das keine elektrische oder starke Ladung besitzt (elektrische Ladungszahl $Z_H = 0$ und starker Farbladungsvektor $\vec{C}_H = \vec{0}$), aber genau wie ϕ^0 die schwache Ladungszahl $I_{\phi^0} = -\frac{1}{2}$ besitzen muss. Überprüft man die Ladungserhaltung bei Umwandlungen des Higgs-Teilchens in einem Prozess wie z. B. $H \rightarrow W^+ + W^-$ so findet man folgendes:

$$\begin{aligned} Z_H &= Z_{W^+} + Z_{W^-} \\ 0 &= +1 + (-1) \\ 0 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_H &\neq I_{W^+} + I_{W^-} \\ -\frac{1}{2} &\neq +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) \\ -\frac{1}{2} &\neq 0 \end{aligned}$$

⁵⁸ Aktuell wird theoretisch untersucht, ob unser Universum "metastabil" ist, weil der (relativ kleine) Wert von λ durch extrem seltene Quantenfluktuationen irgendwo im Universum irgendwann in sehr ferner Zukunft kurzzeitig negativ werden könnte. Da sich damit das Vorzeichen der potenziellen Energie des BEH-Feldes umdrehen würde, hätte dies eine sich über das gesamte Universum ausbreitende "Explosion" des Higgs-Feldes und damit die Vernichtung des Universums in der heutigen Form zur Folge.

⁵⁹ Nach Emmy Noether gehört zu jeder kontinuierlichen Symmetrie ein Erhaltungssatz (Noether Theorem). Ist diese verletzt, gilt auch der Erhaltungssatz nicht mehr.

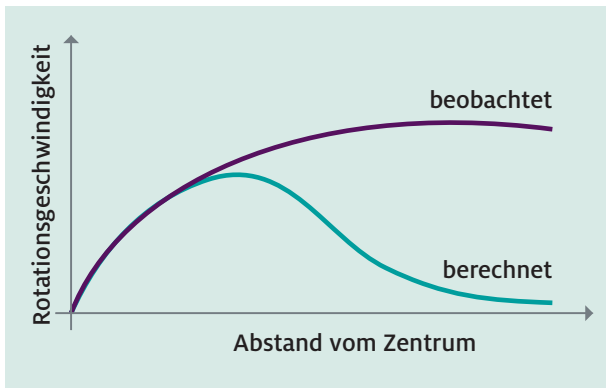


Abb. 64: Rotationsgeschwindigkeit von Sternen um das Zentrum einer Galaxie in Abhängigkeit ihres Abstandes vom Zentrum der Galaxie

(Quelle: verändert nach Johannes Schneider, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dark_matter_diagram.svg, Lizenz CC BY-SA 4.0)

Die Verletzung der Erhaltung der schwachen Ladungszahl bei Wechselwirkungen mit einem Higgs-Teilchen kann man anschaulich so interpretieren, dass das Higgs-Teilchen dabei schwache Ladung aus dem „See schwacher Ladung“ entnimmt oder an ihn abgibt. D.h. der „See“ kompensiert die Verletzung der schwachen Ladungszahlerhaltung. Die Symmetrie ist somit nicht explizit verletzt, sondern nur „versteckt“ und wird durch die Wechselwirkung des Higgs-Teilchens mit dem „See schwacher Ladung“ wiederhergestellt. Im o. g. Beispiel der Umwandlung $H \rightarrow W^+ + W^-$ nimmt das Higgs-Teilchen die schwache Ladung $-I_{\phi^0} = +\frac{1}{2}$ aus dem „See“ auf, wodurch die schwache Ladungserhaltung erfüllt wird:

$$\begin{aligned} I_H + (-I_{\phi^0}) &= I_{W^+} + I_{W^-} \\ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} &= +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) \\ 0 &= 0 \end{aligned}$$

2.8 HYPOTHETISCHE TEILCHEN (EXKURS)

Es gibt eine ganze Reihe hypothetischer Teilchen, die beispielsweise aufgrund offener Fragen der Teilchenphysik oder bisher nicht erklärbarer experimenteller Befunde postuliert wurden. Ein Beispiel hierfür ist die sogenannte Dunkle Materie. Die Dunkle Materie wurde im Rahmen des Standardmodells der Kosmologie postuliert, um die Geschwindigkeit von Sternen, die sich um das Zentrum einer Galaxie bewegen, konsistent mit den experimentellen Beobachtungen beschreiben zu können. In Abb. 64 sind die beobachtete und die theoretisch berechnete Rotationsgeschwindigkeit von Sternen um das Zentrum einer Galaxie in Abhängigkeit ihres Abstandes vom Zentrum dargestellt.

Man erkennt, dass für weit vom Zentrum entfernte Sterne die theoretisch berechnete Rotationsgeschwindigkeit stark von der experimentell gemessenen abweicht. Nimmt man an, dass sich in der Galaxie neben der sichtbaren Materie noch weitere Materie befindet, die nicht sichtbar ist (Dunkle Materie), so lässt sich die beobachtete Rotationsgeschwindigkeit der Sterne erklären.

Doch was genau ist die Dunkle Materie und welche Eigenschaften besitzt sie? Es gibt eine Fülle theoretischer Modelle, die neue, bisher nicht beobachtete Teilchen enthalten, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Um herauszufinden, ob es solche Teilchen gibt, benötigt man Teilchenbeschleuniger und -detektoren⁶⁰. Mit ihrer Hilfe kann man versuchen, bisher noch unbekannte Teilchen zu erzeugen und zu untersuchen.

3 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE

Der vorliegende Fachtext ist in erster Linie an Lehrkräfte gerichtet. Die Inhalte lassen sich in Form eines Spiralcurriculums⁶¹ behandeln, so dass eine wiederkehrende Beschäftigung mit den grundlegenden Konzepten der Elementarteilchenphysik im Physikunterricht in differenzierter Form und Tiefe, in unterschiedlichem Umfang, auf sich steigerndem Niveau und auf der Grundlage unterschiedlicher Vorkenntnisse möglich ist. So können wesentliche Inhalte zu den zentralen Begriffen „Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen“ vermittelt werden:

- **Stufe 1 „Kennen“:** ab dem Ende der Sekundarstufe I oder in der Einführungsphase der gymnasialen Oberstufe im Grundkurs bzw. in Kursen mit grundlegendem Anforderungsniveau auf zunächst qualitativem Niveau
- **Stufe 2 „Analysieren, Rechnen“:** über ein sowohl qualitatives als auch quantitatives Niveau
- **Stufe 3 „Diskutieren und Erläutern“:** bis hin zu einem vertieften Niveau mit höherem Mathematisierungsgrad, empfohlen für den Leistungskurs bzw. Kurse mit erhöhtem Anforderungsniveau.

Eine Übersicht über die Inhalte der aufeinander aufbauenden drei Stufen wird in Kapitel 3.3 dargestellt.

3.1 INHALTLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Sofern die grundlegenden Konzepte der Elementarteilchenphysik nicht verbindlich im Lehrplan für das Unterrichtsfach Physik in der gymnasialen Oberstufe verankert sind, bietet es sich an, geeignete Aspekte im Rahmen der Behandlung des Elektromagnetismus und/oder des Aufbaus der Materie zu thematisieren.

3.2 VORKENNTNISSE

Vorkenntnisse Stufe 1 des Spiralcurriculums:

Die Schüler sollten vor der Beschäftigung mit den Inhalten der 1. Stufe des Spiralcurriculums Vorkenntnisse zu den folgenden physikalischen Themen besitzen:

- Gravitations- und Coulombkraft, elektrische Ladung
- Aufbau von Atomen und Molekülen
- Kernumwandlungen
- Bahnkurve von Körpern im x-y-Diagramm

Vorkenntnisse Stufe 2 des Spiralcurriculums:

Die Schüler sollten vor der Beschäftigung mit den Inhalten der 2. Stufe des Spiralcurriculums – neben den Kenntnissen zu den grundlegenden Konzepten der Elementarteilchenphysik entsprechend der 1. Stufe des Spiralcurriculums – Vorkenntnisse zu den folgenden physikalischen Themen besitzen:

- Elektrisches Feld, Feldlinienbild
- Potenzielle Energie
- Erhaltungssätze, v. a. Energie- und Impulserhaltung
- Bahnkurve von Körpern im x-t-Diagramm

Vorkenntnisse Stufe 3 des Spiralcurriculums:

Die Schüler sollten vor der Beschäftigung mit den Inhalten der 3. Stufe des Spiralcurriculums – neben den Kenntnissen zu den grundlegenden Konzepten der Elementarteilchenphysik entsprechend der 1. und 2. Stufe des Spiralcurriculums – Vorkenntnisse zu den folgenden mathematischen Themen besitzen:

- e-Funktion
- Differential- und Integralrechnung
- Vektorrechnung

3.3 LERNZIELE

Mit der Behandlung der grundlegenden Konzepte der Elementarteilchenphysik im Rahmen des Spiralcurriculums können die nachfolgend dargestellten Lernziele verfolgt werden. Eine Behandlung der Inhalte in der in jeder Stufe spaltenweise dargelegten Reihenfolge wird empfohlen.

STUFE 1: KENNEN	LERNZIELE
Wechselwirkungen Notwendigkeit von vier Wechselwirkungen über mit ihnen verbundenen Phänomenen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> stellen den Zusammenhang zwischen den Begriffen Wechselwirkung und Kraft dar. fassen Kräfte, Teilchenumwandlungen sowie Teilchenerzeugung und –vernichtung unter dem Oberbegriff Wechselwirkung zusammen. begründen die Notwendigkeit der Existenz vier verschiedener Wechselwirkungen. nennen die vier fundamentalen Wechselwirkungen und jeweils mindestens ein zugehöriges Naturphänomen. ordnen verschiedene Naturphänomene den zugrunde liegenden Wechselwirkungen zu.
Ladungen Die drei Wechselwirkungen im Standardmodell und zugehörige Ladungsarten (elektrische, schwache und starke Ladung)	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> nennen die drei Ladungsarten. ordnen jeder Ladungsart eine Wechselwirkung im Standardmodell zu. stellen den Zusammenhang zwischen dem Besitzen einer Ladung und dem Unterliegen einer Wechselwirkung dar.
Kraftgesetze Qualitative Diskussion der vier Kräfte	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> beschreiben qualitativ die Wirkung von Kräften zwischen Körpern / geladenen Teilchen (Anziehung und Abstoßung). beschreiben qualitativ die Abstandsabhängigkeit der Beträge der Kräfte.
Reichweiten Reichweiten der Kräfte	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> nennen die Reichweiten der vier Kräfte. nennen diejenigen Kräfte, die man im Alltag wahrnimmt.
Kopplungsparameter Die drei Kopplungsparameter als Maß für die Stärke der Kraft	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> ordnen jeder Kraft einen Kopplungsparameter als Maß für die Stärke der jeweiligen Kraft zu. ordnen die Stärken der vier Kräfte für sehr kleine Abstände. ordnen die Stärken der vier Kräfte für große Abstände (d. h. im Alltag).

STUFE 1: KENNEN	LERNZIELE
Ordnungsschema Ordnungsschema der Materieteilchen der 1. Generation nach der Anzahl der Ladungsarten	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • nennen die Ladungsarten, die die elementaren Materieteilchen der 1. Generation besitzen. • ordnen die elementaren Materieteilchen der 1. Generation nach der Anzahl der Ladungsarten, die sie besitzen.
Anti-Teilchen, Ordnungsschema Ladungen der Anti-Materieteilchen, Ordnungsschema der Anti-Materieteilchen der 1. Generation nach der Anzahl der Ladungsarten	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben den Zusammenhang zwischen den Ladungen eines Materieteilchens und den Ladungen des entsprechenden Anti-Teilchens. • nennen die Ladungsarten, die die elementaren Anti-Materieteilchen der 1. Generation besitzen. • ordnen die elementaren Anti-Materieteilchen der 1. Generation nach der Anzahl der Ladungsarten, die sie besitzen.
Botenteilchen Botenteilchen der drei Wechselwirkungen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben, wie Wechselwirkungen durch Botenteilchen vermittelt werden können. • nennen die Botenteilchen der drei Wechselwirkungen des Standardmodells. • beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Besitzen einer Ladung bei Teilchen und der Möglichkeit, ein entsprechendes Botenteilchen zu absorbieren oder zu emittieren.
Feynman-Diagramme Darstellung von Wechselwirkungen in Form von x-y-Diagrammen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • Zeichnen einfache Wechselwirkungs-Prozesse in Form von x-y-Diagrammen.

STUFE 2: ANALYSIEREN, RECHNEN	LERNZIELE
Kraftgesetze, Kopplungsparameter Quantitative Diskussion und Vergleich der vier Kräfte für sehr kleine Abstände und für Abstände aus unserem Alltag, Beschreibung der Kräfte mithilfe von Feldlinien	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • geben die Formeln für die Kraftgesetze für sehr kleine Abstände und die allgemeingültigen Formeln an. • beschreiben und vergleichen die Abstandsabhängigkeit der vier Kräfte für sehr kleine Abstände sowie Abstände aus unserem Alltag. • beschreiben die Abhängigkeit der Kräfte von den Massen / Ladungen der miteinander wechselwirkenden Körper bzw. Teilchen. • geben die Größenordnungen der vier Kopplungsparameter an. • beschreiben die Kräfte im Gebiet der $\frac{1}{r^2}$-Abhängigkeit mithilfe von Feldlinien.
Potenzielle Energie Qualitative Diskussion des Zusammenhangs zwischen potenzieller Energie und Kraft, Quantitative Diskussion und grafische Darstellung der potenziellen Energien für sehr kleine Abstände	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • geben die Formeln für die potenziellen Energien für sehr kleine Abstände an. • beschreiben die Abstandsabhängigkeit der potenziellen Energien für sehr kleine Abstände. • beschreiben die Abhängigkeit der potenziellen Energien von den Massen / Ladungen der miteinander wechselwirkenden Körpern bzw. Teilchen für kleine Abstände. • zeichnen die potenziellen Energien als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Körpern bzw. Teilchen für sehr kleine Abstände. • deuten den grafischen Verlauf der potenziellen Energien hinsichtlich der Richtung der wirkenden Kraft (Anziehung / Abstoßung).
Wechselwirkungen Quantitative Diskussion der vier Wechselwirkungen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • berechnen das Verhältnis der Gravitationskraft und der elektromagnetischen Kraft zwischen Elektron und Proton im Wasserstoffatom und deuten das Ergebnis hinsichtlich der Relevanz der gravitativen Wechselwirkung bei Prozessen auf mikroskopischer Ebene. • berechnen die Kraft zwischen Elektron und Proton im Wasserstoffatom aufgrund der starken und schwachen Wechselwirkung.
Reichweiten, Botenteilchen Notwendigkeit der Beschrei- bung von Wechselwirkun- gen, die eine endliche Reichweite besitzen, mithilfe von Botenteilchen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • erläutern die Nicht-Beschreibbarkeit der starken und schwachen Wechselwirkung mithilfe des klassischen Feldlinienmodells. • begründen die Notwendigkeit der Beschreibung der starken und schwachen Wechselwirkung mithilfe von Botenteilchen.

STUFE 2: ANALYSIEREN, RECHNEN	LERNZIELE
Ladungen, Anti-Teilchen Eigenschaften der Ladungen, Ladungszahlen und Farbladungen aller Anti-/Materieteilchen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • nennen die grundlegenden Eigenschaften aller Ladungsarten (additiv, gequantelt, erhalten). • geben die elektrischen und schwachen Ladungszahlen aller Anti-/Materieelementarteilchen an. • geben die drei Farbladungen aller Anti-/Quarks an.
Ordnungsschema Multipletts und Ordnungsschema der Anti-/Materieteilchen der 1., 2. und 3. Generation	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • ordnen die Anti-/Materieteilchen in Dupletts bezüglich der schwachen Ladung. • ordnen die Anti-/Quarks in Tripletts bezüglich der starken Ladung. • beschreiben die Tatsache, dass Teilchenumwandlungen durch die Absorption/Emission von Botenteilchen nur innerhalb eines Multipletts möglich sind. • ordnen die Anti-/Materieteilchen in Generationen.
Feynman-Diagramme Erhaltungssätze bei Wechselwirkungen, Darstellung von Wechselwirkungen in Form von x - t -Diagrammen mit Blackbox	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • nennen Energie, Impuls und Ladungen als Erhaltungsgrößen bei Wechselwirkungs-Prozessen. • zeichnen Wechselwirkungs-Prozesse in Form von x-t-Diagrammen mit Blackbox. • prüfen die Erhaltungssätze aller drei Ladungen bei Wechselwirkungs-Prozessen. • beurteilen die Realisierbarkeit bestimmter Wechselwirkungen hinsichtlich der Erfüllung von Ladungs-, Energie- und Impulserhaltung.
Botenteilchen Wechselwirkungen von Anti-/Materieteilchen mit Botenteilchen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • nennen Energie, Impuls und Ladungen als die Eigenschaften eines Materieteilchens, die sich durch die Emission bzw. Absorption eines Botenteilchens ändern können. • beschreiben die Phänomene der Teilchenerzeugung und -vernichtung über Botenteilchen.

STUFE 3: DISKUTIEREN, ERLÄUTERN	LERNZIELE
Reichweiten Qualitative Diskussion der Gründe für die endliche Reichweite von starker und schwacher Wechselwirkungen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben die Gründe für die endlichen Reichweiten der starken und schwachen Wechselwirkung.
Kraftgesetze Quantitative Diskussion des Übergangsgebiets zwischen sehr kleinen und sehr großen Abständen, in dem sich für die starke und die schwache Wechselwirkung die Abstandsabhängigkeit der Kraft ändert	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • analysieren den Einfluss derjenigen Terme in den Kraftgesetzen der schwachen und starken Kraft, die zu einer Abweichung der $\frac{1}{r^2}$-Abhängigkeit führen. • schätzen den Abstand ab, bei dem diese Terme relevant werden (Übergangsgebiet). • zeichnen die vier Kräfte als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Körper bzw. Teilchen. • berechnen die Abstände für die starke und schwache Kraft, bei denen die $\frac{1}{r^2}$-Abhängigkeit verletzt wird (Übergangsgebiet).
Potenzielle Energie Quantitative Diskussion der potenziellen Energien für beliebige Abstände	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • geben den funktionellen Zusammenhang zwischen einer Kraft und der zugehörigen potenziellen Energie an. • geben die für beliebige Abstände gültigen Formeln für die potenziellen Energien der Wechselwirkungen an. • zeichnen die potenziellen Energien als Funktion des Abstands der wechselwirkenden Körper / Teilchen. • vergleichen die potenziellen Energien von gravitativer, elektromagnetischer und starker Wechselwirkung hinsichtlich der Trennbarkeit gebundener Systeme.

STUFE 3: DISKUTIEREN, ERLÄUTERN	LERNZIELE
Botenteilchen Analogien/Unterschiede sowie Vor-/Nachteile zwischen Feldlinienbild und Austausch von Botenteilchen	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben eine Analogie der Vermittlung von Kräften über den Austausch von Körpern. • beschreiben den durch diese Analogie falsch dargestellten Sachverhalt des „Besitzens“ von Botenteilchen. • beschreiben die Analogien und Unterschiede der Beschreibung von Wechselwirkungen mithilfe von Botenteilchen im Vergleich zur Beschreibung mithilfe von Feldlinien. • nennen Vor- und Nachteile der Beschreibungen einer Wechselwirkung mithilfe von Feldlinien im Vergleich zur Beschreibung mithilfe von Botenteilchen. • beschreiben, wann das Feldlinienmodell und wann das Botenteilchenmodell zur Beschreibung von Wechselwirkungen geeignet ist.
Ladungen Vektorcharakter der starken Ladung, Nichtdeutbarkeit der Masse als Ladung der gravitativen Wechselwirkung	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • geben die besonderen Eigenschaften der starken Farbladung an. • beschreiben den Vektorcharakter der Farbladungsvektoren von Anti-/Quarks. • zeichnen und beschreiben die Farbladungsvektoren von Teilchen, die aus Teilchen zusammengesetzt sind, die eine Farbladung besitzen, im zweidimensionalen Farbgitter. • beschreiben den Grund dafür, dass die Masse nicht die Ladung der gravitativen Wechselwirkung sein kann.
Kopplungsparameter Beziehung zwischen Kopplungsparameter α und der Elementarladung e beim Elektromagnetismus und Vergleich mit der starken und schwachen Wechselwirkung	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • geben den Zusammenhang zwischen dem Kopplungsparameter α_{em} und der Elementarladung e an und interpretieren die Bedeutung der Elementarladung. • vergleichen die Beträge der Ladungszahlen bzw. Ladungsvektoren der drei Wechselwirkungen miteinander. • vergleichen die Kopplungsparameter α_{em}, α_w, α_s der drei Wechselwirkungen miteinander.
Wechselwirkungen Qualitative Diskussion der Auswirkungen der Existenz und der Eigenschaften der verschiedenen Wechselwirkungen auf unser Universum	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben die Auswirkungen, wenn die eine oder andere Wechselwirkungen nicht existieren würde. • beschreiben die Auswirkungen, wenn die eine oder andere Wechselwirkungen andere Eigenschaften besäße.

STUFE 3: DISKUTIEREN, ERLÄUTERN	LERNZIELE
Ordnungsschema Theoretische und experimentelle Aspekte des Standardmodells	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> ordnen die Botenteilchen in Multipletts bezüglich der schwachen und starken Ladung an. beurteilen, welche Aspekte des Standardmodells und insbesondere des Ordnungsschemas der elementaren Anti-/Materieteilchen theoretisch herleitbar sind und bei welchen es sich um rein experimentelle Erkenntnisse handelt.
Feynman-Diagramme Darstellung von Wechselwirkungen in Form von Feynman-Diagrammen (x - t -Diagramme ohne Blackbox)	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> beschreiben, wie Feynman-Diagramme für Wechselwirkungs-Prozesse aus vier fundamentalen Vertices zusammengesetzt werden können. zeichnen Teilchenumwandlung, -erzeugung, -vernichtung in Form von Feynman-Diagrammen ohne Blackbox. zeichnen Wechselwirkungs-Prozesse in Form von Feynman-Diagrammen ohne Blackbox.
Anti-Teilchen Qualitative Diskussion des Materieüberschusses im Universum	Die Schüler <ul style="list-style-type: none"> beschreiben, dass Erzeugung oder Vernichtung von Teilchen und Anti-Teilchen an den fundamentalen Vertices immer paarweise erfolgt. deuten den Überschuss von Materie im Universum und die damit einhergehenden Konsequenzen.

3.4 DIDAKTISCHE HINWEISE

Allgemeines zur Einführung in das Standardmodell

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das seit seiner Entwicklung in allen Experimenten eindrucksvoll bestätigt wurde, ist das Grundgerüst der Teilchenphysik. Diese Theorie liefert einen Dreiklang von Begriffen, die untrennbar miteinander verbunden sind: Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen.

Im Gegensatz zur üblichen Einführung in das Standardmodell wählen wir bewusst nicht eine Übersicht über alle Elementarteilchen, sondern die Ladungen von einigen wenigen bekannten Teilchen als Einstieg. Diese Wahl hat mehrere sowohl didaktische als auch physikalisch motivierte Gründe: Die übliche Aufzählung der Elementarteilchen verleitet zum puren Auswendiglernen, zumal Teilchen der 2. und 3. Generation (außer den Myonen) in unserem Alltag nicht in Erscheinung treten. Zudem kann das Ordnungsschema der Elementarteilchen, d. h. ihre Anordnung (siehe z. B. in Abb. 52 und Abb. 54), ohne die Kenntnis der Ladungen der Elementarteilchen nicht verstanden werden, da dieses Ordnungsschema auf den Ladungen beruht. Die zentrale Rolle der Ladungen wird in der Anordnung der Teilchen in Multipletts bezüglich der Ladungen deutlich: Nur innerhalb eines Multipletts sind Umwandlungen von Teilchen durch Abstrahlung oder Einfang eines Botenteilchens der jeweiligen Wechselwirkung möglich. Damit und mit den Ladungserhaltungssätzen ergibt sich automatisch, welche Vertices (d. h. Wechselwirkungen) erlaubt und welche nicht erlaubt sind. Es ist empfehlenswert, die damit entstehende große Vorhersagekraft des Standardmodells zu erarbeiten, das für beliebige Reaktionen aller bekannten Elementarteilchen vorhersagen kann, welche Prozesse möglich und welche nicht möglich sind. Über den Vergleich der Feynman-Diagramme verschiedener Prozesse ist sogar ein Vergleich der Wahrscheinlichkeiten möglich, mit denen die entsprechenden Prozesse ablaufen (siehe Kapitel

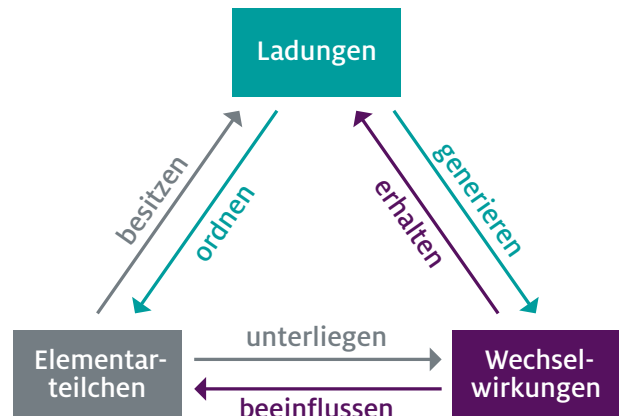


Abb. 65: Die drei Grundpfeiler des Standardmodells: Ladungen, Wechselwirkungen und Elementarteilchen

2.5.8 und 2.5.9). Mit dem hier vorgeschlagenen Erarbeitungsweg soll das Verständnis der grundlegenden Konzepte des Standardmodells befördert und das durch das Aufzählen der elementaren Materieteilchen zu befürchtende Auswendiglernen vermieden werden.

Erweiterung des Ladungsbegriffs

Bereits bei der Einführung in den Elektromagnetismus in der Sekundarstufe I ist es ratsam, auf die spätere Einführung der starken und der schwachen Ladung hinarbeiten und vor allem die Erweiterung des Ladungsbegriffs nicht unnötig zu erschweren. Unter diesem Gesichtspunkt sollten häufig verwendete Formulierungen im Zusammenhang mit der elektrischen Ladung reflektiert werden. Es sollte vermieden werden, anstelle von „elektrischer Ladung“ abkürzend nur von „Ladung“ zu sprechen. Wenn lediglich von Ladung gesprochen wird, erhöht das die Wahrscheinlichkeit, dass Schüler das Ladungskonzept ausschließlich als Konzept des Elektromagnetismus verinnerlichen und so eine Erweiterung bei der Behandlung des Standardmodells deutlich schwieriger werden kann. Es spricht nichts dagegen, die elektrische Ladung als eine spezielle Ladungsart einzuführen und auf die mögliche Behandlung weiterer Ladungsarten in der Sekundarstufe II zu verweisen. Weiterhin sollte die elektrische Ladung als charakteristische und

intrinsische Teilcheneigenschaft eingeführt werden. Genau genommen ist die charakteristische Teilcheneigenschaft die elektrische Ladungszahl. Die elektrische Ladung ergibt sich als Produkt aus Elementarladung e und elektrischer Ladungszahl Z . Die Elementarladung ist eine energie- bzw. abstandsabhängige Größe und bestimmt die Kopplungsstärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie ist daher als Eigenschaft der Wechselwirkung und nicht der Teilchen zu verstehen. In diesem Kontext sind bestenfalls Formulierungen zu vermeiden, die dieser Interpretation des Ladungsbegriffs widersprechen. Insbesondere sollte stets die Zugehörigkeit der elektrischen Ladung zu einem Teilchen betont, also z. B. stets von elektrischem Strom als Bewegung elektrisch geladener Teilchen und nicht nur als „Bewegung von Ladungen“ gesprochen werden. Auch die Formulierung „ein Teilchen trägt eine elektrische Ladung“ sollte vermieden werden, denn diese suggeriert, dass das Teilchen diese Ladung ohne weiteres ablegen kann. Die Formulierung „ein Teilchen besitzt eine elektrische Ladung“ ist deutlich besser geeignet, um die Vorstellung von Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften zu festigen.

Begründung der Notwendigkeit von vier Kräften

Zu Beginn von Kapitel 2 und als Einstieg in die Stufe 1 des Spiralcurriculums wird aus bekannten Phänomenen die Notwendigkeit für genau vier fundamentale Kräfte begründet, die sofort auch mit dem allgemeineren Begriff „Wechselwirkungen“ in Verbindung gebracht werden. Begonnen wird dabei mit den beiden makroskopisch erfahrbaren und für die Schüler bekannten Kräfte: der Gravitationskraft und der Coulombkraft. Aus der Tatsache, dass Atomkerne trotz der sich elektrisch abstoßenden Protonen stabil sind, wird gezeigt, dass eine weitere Kraft, die starke Kraft, existieren muss, die die Nukleonen im Kern zusammenhält. Über die Kernfusion in der Sonne und/oder die β -Umwandlung von Nukleonen kann schließlich die schwache Wechselwirkung eingeführt werden. In Kapitel 2.2.4

wurde als Motivation für die Einführung der schwachen Wechselwirkung die Tatsache genannt, dass bei β -Umwandlungen Neutrinos entstehen, die weder eine elektrische noch eine starke Ladung besitzen und dass diese Prozesse daher nicht auf die elektromagnetische oder die starke Wechselwirkung zurückgeführt werden können. Eine andere mögliche Argumentation ist, dass β -Umwandlungen, sofern man nur die Energie- und Impulserhaltung sowie die Erhaltung der elektrischen Ladung betrachtet, auch ohne die Entstehung eines Neutrinos möglich wären. Dass diese Prozesse aber grundsätzlich an die Entstehung eines Neutrinos gekoppelt sind⁶², lässt den Schluss zu, dass β -Umwandlungen ohne Neutrinos einen anderen Erhaltungssatz verletzen, nämlich den der schwachen Ladung. Auf diese Weise kann die Einführung der schwachen Ladung ebenfalls motiviert werden.

Wechselwirkung als Oberbegriff

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt drei der vier bekannten fundamentalen Wechselwirkungen. D. h. es beschreibt, wie Elementarteilchen durch Emission oder Absorption von Botenteilchen umgewandelt werden, wie aus einem Botenteilchen ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen kann, wie aus einem Teilchen-Anti-Teilchen-Paar ein Botenteilchen entstehen kann und wie durch Botenteilchen Kräfte vermittelt werden. Der im Fachtext verwendete Begriff der Wechselwirkung umfasst all diese genannten Phänomene, insbesondere auch die Vermittlung von Kräften. Er ist somit ein Oberbegriff, der Kräfte einschließt.

Verwendung des Begriffs „Botenteilchen“ statt „Austauschteilchen“

Wechselwirkungen von Elementarteilchen werden durch Botenteilchen vermittelt, die auch als Austauschteilchen oder Eich- bzw. Vektorbosonen bezeichnet werden. Im Fachtext wird ausschließlich die Bezeichnung Botenteilchen verwendet. Diese Bezeichnung bietet sich auch bei der Behandlung im Schulunterricht an. Die Gründe hierfür sind folgende:

⁶² Dies weiß man, da die entstehenden Elektronen eine kontinuierliche Energieverteilung aufweisen, was ohne die Entstehung eines dritten Teilchens – dem Neutrino – nicht der Fall sein dürfte.

- Die Bezeichnung „Austauschteilchen“ betont die Vermittlung einer Kraft durch einen Austausch von Teilchen. Eine Wechselwirkung umfasst jedoch darüber hinaus auch die Phänomene der Teilchenumwandlung, -erzeugung und -vernichtung sowie die freie Ausbreitung von Botenteilchen im Fall von Photonen. Um zu vermeiden, dass der Begriff der Wechselwirkung ausschließlich auf Kräfte reduziert wird, wird daher die Bezeichnung „Botenteilchen“ bevorzugt.
- Im Zusammenhang mit den in Abb. 25 und 26 dargestellten Analogien zur Vermittlung einer Kraft zwischen Teilchen vermeidet die Bezeichnung „Botenteilchen“ im Gegensatz zur Bezeichnung „Austauschteilchen“ die Vorstellung, dass das Botenteilchen von einem der wechselwirkenden Teilchen „besessen“ und an das andere Teilchen „übergeben“ wird. Dies ist jedoch nicht der Fall: Das Botenteilchen wird von einem Materieteilchen erzeugt (emittiert) und von dem anderen Materieteilchen absorbiert. Aus demselben Grund sollten ebenfalls Formulierungen der Form „ein Botenteilchen wird zwischen zwei Materieteilchen ausgetauscht“ vermieden und besser Formulierungen der Art „ein Botenteilchen vermittelt die Wechselwirkung zwischen den beiden Materieteilchen“ verwendet werden.

Kopplungsparameter und Kraftgesetze

Um die Ähnlichkeit aller Kraftgesetze und potenziellen Energien (insbesondere bei sehr kleinen Abständen) zu verdeutlichen, werden für alle Wechselwirkungen die Kopplungsparameter (auch: Kopplungskonstanten) α_i eingeführt und die Kräfte sowie potenziellen Energien mithilfe des jeweiligen α_i ausgedrückt. Diese Form z. B. des Coulombgesetzes mag für die Schüler zunächst ungewohnt erscheinen. Sie hat jedoch den Vorteil, dass dadurch das umfassende Konzept der Kräfte, der potenziellen Energien und insbesondere der Ladungen und Kopplungsparameter für drei der vier Wechselwirkungen aus den Ähnlichkeiten der mathematischen Gleichungen unmittelbar ersichtlich ist. Das Wesen

der Physik, viele (in der Teilchenphysik sogar alle relevanten) Phänomene mit einem einzigen Konzept beschreiben zu können, wird hier deutlich.

Bemerkung: Drei der vier Wechselwirkungen lassen sich auf drei fundamentale Ladungs-Symmetrien zurückführen, deren einzige freie Parameter die drei Kopplungsparameter α_i sind. Die Eigenschaften der Ladungen und Wechselwirkungen einschließlich der Anzahl und Ladungen der Botenteilchen folgen vollständig aus diesen Symmetrien. Eine hypothetische noch weitere Vereinheitlichung dieser drei Wechselwirkungen mit der gravitativen Wechselwirkung zu einer einzigen Wechselwirkung wird in der Einleitung (siehe Kapitel 2.1) thematisiert.

Diskussion der potenziellen Energien

Für alle vier Wechselwirkungen werden aus zwei Gründen gleichzeitig mit den Kräften die potenziellen Energien eingeführt, sowohl als mathematische Ausdrücke als auch als grafische Darstellungen: Zum einen sind die mathematischen Ausdrücke für die potenziellen Energien teilweise einfacher als diejenigen für die Kräfte, zum anderen lassen sich Effekte wie die Ionisation von Atomen oder das Eingesperrtsein („Confinement“) der Quarks in gebundenen Zuständen direkter mithilfe der potenziellen Energie diskutieren. Da außerdem in der Quantenmechanik der Bahn-begriff, wie er in der klassischen Physik verwendet wird, keine Gültigkeit mehr besitzt, sind in einer Quantenfeldtheorie wie dem Standardmodell der Teilchenphysik Geschwindigkeiten und Beschleunigungen und damit Kräfte grundsätzlich nicht mehr zur quantitativen physikalischen Beschreibung geeignet. Z. B. beim Wasserstoffatom oder bei gebundenen Quark-Anti-Quark-Zuständen („Mesonen“) gehen dementsprechend die jeweiligen potenziellen Energien der elektrischen oder starken Wechselwirkung in die Schrödingergleichung ein.

Theoretische und experimentelle Aspekte des Standardmodells

Es ist lohnend, bei der Behandlung des Standardmodells zumindest in der Stufe 3 des Spiralcurriculums

zu diskutieren, welche Aspekte des Standardmodells theoretisch verstanden sind, und welche zwar im Standardmodell enthaltene experimentelle Fakten sind, aber (noch) nicht theoretisch erklärt werden können⁶³. So sind z. B. die Beziehungen zwischen den jeweiligen Ladungen und Wechselwirkungen und die Notwendigkeit von Botenteilchen sehr umfassend theoretisch verstanden: Die Botenteilchen wurden sogar aufgrund der theoretischen Vorhersagen entdeckt. So wurden die W- und Z-Teilchen (vorhergesagt 1961 von S. Glashow) indirekt 1973 und direkt 1982 am CERN nachgewiesen und die Gluonen (vorhergesagt 1973 von den „Vätern“ der starken Wechselwirkung wie Gross, Politzer, Wilczek, Leutwyler, Weinberg, Fritsch, Gell-Mann) 1979 am DESY entdeckt. Im Gegensatz dazu ist die Existenz von exakt drei Generationen von Materieteilchen und ihre genaue Anordnungsweise in den Ladungsmultipletts ein rein experimenteller Fakt, den das Theoriegerüst des Standardmodells nicht vorhersagen kann. Theoretisch folgt aus den Ladungssymmetrien des Standardmodells nämlich ausschließlich, dass Materieteilchen sich in Multipletts bezüglich der Ladungen anordnen lassen. Welche und wie viele Multipletts die Natur tatsächlich realisiert hat, wurde rein experimentell geklärt. Die Dupletts der schwachen Ladung wurden z. B. von Stephen Weinberg 1967 zunächst nur anhand der ersten beiden Leptonengenerationen eingeführt⁶⁴, da die 1964 postulierten Quarks damals noch pure Spekulation waren. Erst im Folgenden wurden von 1968 bis 1974 zunächst die Quarks der ersten beiden Generationen und zwischen 1975 und 2000 dann die dritten Generationen von Leptonen und Quarks entdeckt und nach und nach ins Ordnungsschema der Materieteilchen eingefügt. Dies ähnelt dem schrittweisen Füllen des Periodensystems der chemischen Elemente, bei dem die theoretische Erkenntnis ebenfalls im System der Ordnung liegt und nicht in der genauen Anzahl der zu jeder Hauptgruppe gehörenden Elemente. Die eigentliche Idee des Standardmodells ist eine (auf Symmetrien basierende) Theorie von Ladungen und Wechselwirkungen und die Vorhersa-

ge der Botenteilchen, die diese Wechselwirkungen vermitteln. Es erklärt die Spielregeln im Universum, die die Materieteilchen als Spieler einhalten müssen, und nicht die Zahl der Spieler auf dem Spielfeld.

Die Symmetrien des Standardmodells

Die drei durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschriebenen Wechselwirkungen können aus drei verschiedenen Symmetrien (sogenannte „lokale Eichsymmetrien“) abgeleitet werden. Für diese wohl tiefgehendste physikalischen Erkenntnis, die die Menschheit bisher über das Universum erlangt hat, lassen sich auf Schulniveau zwar Hinweise vermitteln, eine vollständige Behandlung ist aber wegen der dazu nötigen Gruppentheorie leider nicht möglich. Einen solchen Hinweis auf Symmetrieeigenschaften bilden z. B. die drei Farbladungsvektoren von Quarks, da sich die Quarks an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks (Drehsymmetrie um 120°) im Farbgitter befinden. Eine Drehung der Achsen des Farbgitters um 120° ist ein Beispiel für eine spezielle Symmetrietransformation innerhalb der Eichsymmetrie der starken Ladung. In den fachlichen Hinweisen (Kapitel 3.5) finden sich weitere Hintergrundinformationen zu Eichsymmetrien.

x-y-Diagramme und Feynman-Diagramme

Feynman-Diagramme dienen der Veranschaulichung eines Wechselwirkungsprozesses. In einem Feynman-Diagramm wird der Wechselwirkungsprozess in einem Ort-Zeit-Diagramm (x-t-Diagramm) dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht eine Veranschaulichung der zeitlichen Abfolge der einzelnen Wechselwirkungen in einem gewählten Bezugssystem.

Um die Anschlussfähigkeit an den Unterricht zu erhöhen, wird im Fachtext zusätzlich die Darstellung von Wechselwirkungsprozessen im Ort-Ort-Diagramm (x-y-Diagramm) verwendet. Aus dieser Darstellung kann der zeitliche Ablauf der Wechselwirkung nicht abgelesen werden. Es werden hierbei ausschließlich die Koordinaten der bei der Wechsel-

⁶³ Die Bezeichnungen „verstanden“ und „erklärt“ werden hier in dem Sinn verwendet, dass es für die Standardmodell-Theorie möglich ist, diese Tatsachen aus einem tiefer liegenden Prinzip herzuleiten, das die Grundlage der Theorie bildet – dem Prinzip der (Eich-)Symmetrien von Ladungen. Warum die Natur wiederum gerade diese Symmetrien erfüllt, ist dagegen noch unverstanden und könnte nur durch eine noch grundlegendere Theorie erklärt werden.

⁶⁴ Siehe Weinberg, 1967: www.hep.uiuc.edu/LC/pdf_docs/weinberg.pdf „A Model of Leptons“.

wirkung beteiligten Teilchen zu allen Zeiten abgebildet, ähnlich wie Spuren, die Teilchen in einem Detektor hinterlassen

Bemerkungen: Auch wenn die Teilchen im x - t - und x - y -Diagramm durch Linien dargestellt sind, so kann dennoch nicht durchgehend von einer Bahnkurve der Teilchen gesprochen werden. Die eigentlichen Reaktionen finden in winzigen Raumgebieten von weit weniger als 1 fm Ausdehnung statt, die entweder durch eine Blackbox oder ein eingekreistes Feynman-Diagramm gekennzeichnet werden. In diesem Raumgebiet ist der Ort x eines Teilchens aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation nicht mehr genau festgelegt und die Linien in den Feynman-Diagrammen repräsentieren keine Bahnen, sondern vielmehr quantenmechanische Wellenfunktionen. Die Ortskoordinate ist dabei nur qualitativ zu verstehen und selbst die zeitliche Reihenfolge der Wechselwirkungen ist oft nicht eindeutig. Außerhalb der Kreise oder Blackboxes bei makroskopischen Abständen ist in der hochenergetischen Teilchenphysik die Bahnunschärfe so gering, dass z. B. der Weg vom Kollisionspunkt zum Detektor durchaus als klassische Bahn aufgefasst werden kann.

Weiterhin werden in den vorliegenden Materialien zur Beschreibung bestimmter Prozesse lediglich Feynman-Diagramme mit der kleinstmöglichen Anzahl an Vertices (man sagt: Feynman-Diagramme der führenden Ordnung) betrachtet. Prinzipiell gibt es unendlich viele Diagramme, die von gegebenen Ausgangsteilchen zu bestimmten auslaufenden Teilchen führen, je nachdem, welche Wechselwirkungen „im Inneren“ der Feynman-Diagramme stattfinden. Hier wurde sich jeweils auf die einfachsten Diagramme beschränkt.

Feynman-Diagramme können auch als Ladungsfluss-Diagramme angesehen werden. Genauere Ausführungen dazu finden sich in den Fachlichen Hinweisen: Feynman-Diagramme als Ladungsflussdiagramme am Beispiel des Pion-Austausch.

Verwendung verschiedener grafischer Darstellungen von Wechselwirkungsprozessen im Spiralcurriculum:

In **Stufe 1** des Spiralcurriculums werden Wechselwirkungsprozesse ausschließlich in Form von x - y -Diagrammen dargestellt. Anhand der x - y -Diagramme können die Phänomene der Teilchenerzeugung und der Teilchenvernichtung diskutiert werden. Die Details des Wechselwirkungsprozesses sind hinter einer Blackbox (in Form einer schwarzen Kreisscheibe) verborgen. Die Vermittlung der Wechselwirkung zwischen Teilchen durch ein Botenteilchen wird somit nicht dargestellt.

In **Stufe 2** des Spiralcurriculums werden Wechselwirkungsprozesse in Form von Feynman-Diagrammen (x - t -Diagramme) dargestellt. In dieser Darstellung können sowohl die Phänomene der Teilchenerzeugung und der Teilchenvernichtung als auch der zeitliche Ablauf der Wechselwirkungsprozesse und damit die Erhaltungssätze im Vergleich zwischen Anfangszustand und Endzustand besser diskutiert werden. Die Details des Wechselwirkungsprozesses sind wie in Stufe 1 des Spiralcurriculums hinter einer Blackbox verborgen. Die Vermittlung der Wechselwirkung zwischen Materieteilchen durch ein Botenteilchen wird somit auch hier nicht explizit dargestellt.

In **Stufe 3** des Spiralcurriculums werden Wechselwirkungsprozesse, wie in Stufe 2, in Form von Feynman-Diagrammen (x - t -Diagramme) dargestellt. Im Unterschied zu Stufe 2 sind die Details des Wechselwirkungsprozesses, d. h. die Vertices, nun explizit dargestellt. Bei den in Stufe 3 verwendeten Diagrammen handelt es sich daher um die „eigentlichen“ Feynman-Diagramme⁶⁵. Durch die detaillierte Darstellung ist sowohl eine genaue Diskussion der Teilchenerzeugung und Teilchenvernichtung als auch der zeitlichen Abfolge der im Feynman-Diagramm dargestellten Wechselwirkungsprozesse und damit der Erhaltungssätze zu jedem Zeitpunkt des Prozesses möglich. Außerdem ermöglichen diese Diagramme die Visualisierung der Vermittlung von Wechselwirkungen zwischen Materieteilchen durch Botenteilchen.

⁶⁵ R. P. Feynman: Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics. Phys. Rev. 76, S. 769
<http://authors.library.caltech.edu/3523/1/FEYpr49c.pdf>.

Geschwindigkeit von Teilchen im Feynman-Diagramm

Die Feynman-Diagramme der Stufen 2 und 3 des Spiralcurriculums veranschaulichen teilchenphysikalische Prozesse in Form von Ort-Zeit-Diagrammen. Auf der Ordinate ist die x -Koordinate des Ortes des Teilchens und auf der Abszisse die Zeit t aufgetragen. Das Ort-Zeit-Diagramm stellt somit eine zweidimensionale Projektion eines Wechselwirkungsprozesses dar, der in der vierdimensionalen Raumzeit ($x, y, z, c \cdot t$) abläuft. Da es sich um eine zweidimensionale Projektion handelt, ist aus dem Ort-Zeit-Diagramm prinzipiell nur die x -Komponente der Geschwindigkeit \vec{v} der Teilchen ablesbar. Der Betrag der Geschwindigkeit $|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ der Teilchen lässt sich nicht ablesen. Darüber hinaus ist die Geschwindigkeit von Teilchen im Inneren eines Feynman-Diagramms (sog. virtuellen Teilchen) nicht sinnvoll definierbar.

Beschränkung der behandelten Themen und Begriffsbildungen

Das Ziel dieser Materialien besteht darin, zu verdeutlichen, wie die fundamentalen Erkenntnisse des Standardmodells der Teilchenphysik als verbindendes und einheitliches Konzept für die Beschreibung scheinbar völlig unterschiedlicher Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen dienen. Die Auswahl und Tiefe der Themen und Begriffsbildungen sind deshalb notwendigerweise anders als in anderen Darstellungen des Standardmodells. Einige Begriffe und Themen werden im Fachtext tiefergründiger als üblich behandelt, um z. B. die Eleganz und Bedeutung des Ladungsbegriffes herauszuarbeiten. Andere werden ganz weggelassen, weil sie für das hier dargelegte Konzept nicht relevant sind oder zu weit führen würden.

3.5 FACHLICHE HINWEISE

Die im Fachtext dargelegten Sachverhalte umfassen die wesentlichen theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis des Standardmodells und letztendlich zu dessen Einführung im Schulunterricht verinnerlicht werden sollten. In den dortigen Ausführungen wurde sich besonders auf die zentrale Rolle des Ladungskonzeptes konzentriert. Einige vertiefende Inhalte des Standardmodells wurden nicht aufgegriffen, um die allgemeine Verständlichkeit zu gewährleisten und den Fokus auf die besonders relevanten Aspekte zu lenken. Für interessierte Leser können die nachfolgenden fachlichen Hinweise zur Vertiefung ausgewählter Inhalte des Standardmodells dienen.

Abstandsabhängigkeit der Kopplungsparameter

Das Verhalten des für kleine Abstände logarithmisch abnehmenden Kopplungsparameters α_s wird auch asymptotische Freiheit der Quarks genannt. Dies darf aber keinesfalls so interpretiert werden, dass die Kraft zwischen Quarks mit kleinerem Abstand abnimmt, im Gegenteil: Der $\frac{1}{r^2}$ -Term der starken Kraft überkompensiert die langsame (logarithmische) Abstandsabhängigkeit von α_s , so dass die „Freiheit“ nur den Kopplungsparameter betrifft: Man sagt, die Stärke der Wechselwirkung – ausgedrückt durch ihren Kopplungsparameter – wird bei kleinen Abständen geringer. Die starke Kraft wird jedoch bei sich verringerndem Abstand größer, genau wie bei den anderen Wechselwirkungen. Dies wird in der Literatur oft falsch dargestellt, insbesondere wenn der Begriff „Kraft“ analog zum Begriff „Wechselwirkung“ verwendet wird.

Neben dem starken Kopplungsparameter α_s ändern sich auch die beiden anderen Kopplungsparameter α_{em} und α_w als Funktion des Abstands⁶⁶, nur wesentlich langsamer. Der elektromagnetische Kopplungsparameter beispielsweise wächst

⁶⁶ Wechselwirkungsprozesse, bei denen eine hohe Energie übertragen wird, sind äquivalent zu Prozessen, die bei sehr kleinen Abständen ablaufen. Aufgrund dieser Identifikation spricht man auch von einer Energieabhängigkeit der Kopplungsparameter.

logarithmisch um nur ca. 7 % vom Wert für große Abstände $\alpha_{\text{em}}(r > 10 \text{ fm}) \approx \frac{1}{137}$ (Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante) auf $\alpha_{\text{em}}(r = 0,001 \text{ fm}) = \frac{1}{128}$ für die heute in Teilchenkollisionen typischen subnuklearen Abstände der Größenordnung Attometer. Extrapoliert man die Kopplungsparameter für noch kleinere Abstände, treffen sie sich interessanterweise bei $r \approx 10^{-13} \text{ fm}$ (fast) in einem Punkt bei Werten im Bereich $\alpha_i(r = 10^{-13} \text{ fm}) \approx \frac{1}{40}$ bis $\frac{1}{50}$, was zu Spekulationen über einen gemeinsamen Ursprung der Wechselwirkungen Anlass gibt. Für die Behandlung der Teilchenphysik in der Schule genügt es im Allgemeinen, die Kopplungsparameter als konstant zu betrachten.

Schwache Ladung

Im Fachtext kommt dem Ladungsbegriff eine zentrale Bedeutung zu, wobei auch die (leider anderswo viel zu selten diskutierte) schwache (Isospin-)Ladung u. a. für die Ordnung von Teilchen, als Erhaltungsgröße bei Wechselwirkungen und zum Verständnis des Brout-Englert-Higgs-Mechanismus eine zentrale Rolle spielt. Zu beachten ist, dass in der Literatur diese schwache (Isospin-)Ladung oft nur als „schwacher Isospin“ oder gar nur als „Isospin“⁶⁷ bezeichnet wird, ohne dass ihr Ladungscharakter explizit betont wird. Die schwache Isospin-Ladung besitzt große mathematische Ähnlichkeit mit dem Spin. Elektronen mit halbzahligen Spin $S = \frac{1}{2}$ können bezüglich der z-Komponente des Spins nur die beiden Zustände $S_z = +\frac{1}{2}$ oder $S_z = -\frac{1}{2}$ besitzen (die so genannten *m*-Quantenzahlen der Atomphysik). Dasselbe gilt für die schwache Isospin-Ladung: Sie besitzt – genau wie der Spin – eigentlich drei Komponenten $\vec{I} = (I^{(1)}, I^{(2)}, I^{(3)})$, nur nicht im örtlichen Raum, sondern im abstrakten Raum der schwachen Ladung. Genau wie beim Spin kann ein Teilchen mit schwacher Isospin-Ladung $|\vec{I}| = \frac{1}{2}$ als dritte Komponente entweder $I^{(3)} = +\frac{1}{2}$ oder $I^{(3)} = -\frac{1}{2}$ besitzen. Da die beiden anderen Komponenten $I^{(1)}$ und $I^{(2)}$ (genau wie beim Spin) keine Rolle spielen, solange keine vektorielle Addition von schwachen Isospin-Ladungen oder eine mathematische

Diskussion der Eichsymmetrien durchgeführt wird, und da sie darüber hinaus untereinander und mit $I^{(3)}$ einer Unbestimmtheitsrelation unterliegen, wird im Fachtext nicht auf die beiden anderen Komponenten der schwachen Ladung eingegangen⁶⁸. Dort wird deshalb $I^{(3)} = +\frac{1}{2}$ bzw. $I^{(3)} = -\frac{1}{2}$ als schwache Ladungszahl mit den einfacheren Symbolen $I = +\frac{1}{2}$ bzw. $I = -\frac{1}{2}$ bezeichnet. Dies ist beim Vergleich mit weiterführender Fachliteratur zu beachten.

Ladungsprodukt und Anziehung sowie Abstoßung von schwach und stark geladenen Teilchen

Ob sich zwei geladene Teilchen anziehen oder abstoßen, lässt sich am Vorzeichen des Produkts der entsprechenden Ladungen ablesen. Ist das Produkt positiv, stoßen sie sich ab. Ist es negativ, ziehen sie sich an. Bei der elektrischen Ladung werden für dieses Produkt einfach die beiden Ladungszahlen miteinander multipliziert. Bei den mehrkomponentigen Ladungen der schwachen und starken Wechselwirkung muss stattdessen deren Skalarprodukt verwendet werden. Da die Ladungskomponenten quantenmechanischen Unbestimmtheitsrelationen unterliegen, muss deren Skalarprodukt jedoch komplizierter als nach den üblichen Rechenregeln (Summe der Produkte der Komponenten) ausgewertet werden.

Für interessierte Leser wird dies im Folgenden am Beispiel von zwei Teilchen mit schwachen (Isospin-) Ladungen \vec{I}_1 und \vec{I}_2 erläutert, deren Betrag $|\vec{I}_1| = |\vec{I}_2| = \frac{1}{2}$ gleich ist, und deren dritte Komponenten unterschiedliche Vorzeichen haben, so dass für die dritte Komponente der Gesamtladung $I^{(3)} = I_1^{(3)} + I_2^{(3)} = 0$ gilt. Ein System aus diesen zwei Teilchen kann entweder die gesamte schwache Ladung $|\vec{I}| = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| = 0$ oder $|\vec{I}| = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| = 1$ besitzen, je nachdem wie die beiden Vektoren \vec{I}_1 und \vec{I}_2 relativ zueinander orientiert sind. Das Skalarprodukt $\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2$ erhält man quantenmechanisch über Ausmultiplizieren von

⁶⁷ Dies führt verbreitet zu Verwechslungen mit dem historisch älteren „starken Isospin“, der sich ausschließlich auf das Ordnungsschema der Up- und Down-Quarks bezieht. Dieser stellt keine Ladung im hier verwendeten Sinn dar, da zu ihm keine Wechselwirkung korrespondiert. Er wird deshalb im Folgenden nicht weiter behandelt.

⁶⁸ Bei der starken Ladung werden aus analogen Gründen sogar sechs der acht Komponenten ignoriert. Die beiden relevanten Komponenten werden als Vektoren im 2-dimensionalen Farbgitter dargestellt.

$$(\vec{I})^2 = (\vec{I}_1 + \vec{I}_2)^2 = (\vec{I}_1)^2 + 2\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2 + (\vec{I}_2)^2$$

durch die Umformung:

$$2\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2 = (\vec{I})^2 - (\vec{I}_1)^2 - (\vec{I}_2)^2$$

Beim Ausrechnen muss man für (Iso-)Spins die besondere Regel über den „Erwartungswert“ ihres Quadrats berücksichtigen: $(\vec{I})^2 = |\vec{I}| \cdot (|\vec{I}| + 1)$. Diese Gleichung gilt sowohl für das Quadrat der Gesamtladung als auch für das Quadrat der schwachen Ladung eines der beiden Teilchen. Dies führt für das Skalarprodukt der schwachen Isospin-Ladungen zu unterschiedlichen Ergebnissen für die beiden Fälle

$$|\vec{I}| = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| = 0 \Rightarrow 2\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2 = 0 - \frac{3}{4} - \frac{3}{4} = -\frac{3}{2}$$

(Anziehung)

$$|\vec{I}| = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| = 1 \Rightarrow 2\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2 = 2 - \frac{3}{4} - \frac{3}{4} = +\frac{1}{2}$$

(Abstoßung)

Der Wert des Skalarprodukts ist also nicht eindeutig durch die einzelnen Ladungen und ihre dritten Komponenten gegeben, sondern hängt zusätzlich vom Betrag der Summe $|\vec{I}| = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2|$ ab⁶⁹.

Endliche Reichweite von massebehafteten Botenteilchen

In der klassischen Physik werden Kraftwirkungen durch Felder beschrieben. Die Feldlinien des elektrischen Feldes einer Anordnung elektrischer Ladungen desselben Vorzeichens erstrecken sich im Vakuum ins Unendliche. Endliche Reichweiten des Feldes lassen sich nur durch die Anwesenheit weiterer elektrischer Ladungen mit umgekehrtem Ladungsvorzeichen erreichen (z. B. ist beim genügend weit ausgedehnten Plattenkondensator das Feld außerhalb der Platten gleich Null).

In der Teilchenphysik besitzt jedoch die Kraftwirkung einer einzigen Ladung der schwachen Wechselwirkung bereits im Vakuum eine endliche Reichweite, was sich durch Feldlinien nur schwer darstellen

lässt. Im Formalismus der Kraftübertragung durch Austausch von Botenteilchen ergibt sich eine endliche Reichweite jedoch automatisch, wenn die Botenteilchen eine Masse besitzen. Die exakte Herleitung dieses Zusammenhangs erfolgt über sog. Feynman-Propagatoren, was aber weit jenseits der hier behandelten Themen liegt.

In der Literatur wird die endliche Reichweite massebehafteter Botenteilchen oft fälschlicherweise über eine kurzzeitige Verletzung der Energieerhaltung bei der Entstehung der Botenteilchen nach der Heisenbergschen Unbestimmtheit erklärt. Mit dieser Begründung erhält man aber nur zufällig das richtige Ergebnis. Physikalisch ist dies unhaltbar, da an allen Vertices von Feynman-Diagrammen, also auch bei der Entstehung der Botenteilchen, streng die Energie- und Impulserhaltung gilt. Eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes findet nicht statt. Möchte man dennoch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation verwenden, so ist die folgende Argumentation möglich, aber wegen ihrer Komplexität kaum für Schüler geeignet: Prinzipiell dürfen Botenteilchen bei der Vermittlung einer Wechselwirkung nicht direkt lokalisierbar sein (da sie dabei sog. „virtuelle Teilchen“ sind). Versucht man, den Ort eines bestimmten Botenteilchens zu finden, darf man höchstens einen Impuls von bis zu $\Delta p = m \cdot c$ auf dieses Botenteilchen übertragen, denn mit einem Energieübertrag $\Delta E = \Delta p \cdot c > m \cdot c^2$ könnte ein weiteres, neues Botenteilchen entstehen. Dann wäre nicht mehr klar, welches Botenteilchen gerade gemessen wird. Mit einem solchen maximalen Impulsübertrag lässt sich der Ort des Botenteilchens mit einer Genauigkeit von $\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{\Delta p \cdot c} = \frac{\hbar \cdot c}{m \cdot c^2}$ bestimmen. Um nicht lokalisierbar zu sein, muss die Reichweite des Botenteilchens also kleiner sein als dieses λ , das oft auch „Comptonwellenlänge“ des Botenteilchens genannt wird.

Massen von Quarks als Konstituenten in gebundenen Zuständen

Die Gesamtenergie E_{ges} von gebundenen Zuständen jeder Wechselwirkung berechnet sich aus der

⁶⁹ Alternativ könnte man auch mit der quantenmechanischen Vertauschungssymmetrie argumentieren, d.h. ob die Gesamtwellenfunktion des physikalischen Systems bei Vertauschung der Teilchen ihr Vorzeichen ändert, oder elegant mit mathematischer Gruppentheorie arbeiten. Beides liegt jenseits der Ziele des Fachtextes und der fachlichen Hinweise.

Summe der Ruheenergien $m_i \cdot c^2$ der Konstituenten abzüglich der bei der Bindung frei gewordenen (hier positiv gezählten) Bindungsenergie E_B

$$E_{\text{ges}} = \sum m_i \cdot c^2 - E_B,$$

womit sich für deren Gesamtmasse ein so genannter „Massendefekt“ von $\frac{E_B}{c^2}$ ergibt:

$$m_{\text{ges}} = \sum m_i - \frac{E_B}{c^2}$$

Bei der gravitativen und elektromagnetischen Bindung ist dieser Massendefekt unmessbar klein. Im Grundzustand des Wasserstoffatoms beträgt beispielsweise $E_B = E_{\text{Rydberg}} = 13,6 \text{ eV}$, so dass die Gesamtmasse eines Wasserstoffatoms mit $m_H = m_p + m_e - E_{\text{Rydberg}} = 938\,272\,081 \frac{\text{eV}}{c^2} + 510\,999 \frac{\text{eV}}{c^2} - 14 \frac{\text{eV}}{c^2} = 938\,783\,066 \frac{\text{eV}}{c^2}$ nur um ein 67 Millionstel kleiner ist als die Summe der Massen seiner Konstituenten. Die Gesamtmasse des gebundenen Erde-Mond Systems, die für die Berechnung des Umlaufs um die Sonne relevant ist, beträgt wegen der Bindungsenergie sogar nur ein 13 Billionstel weniger als die Summe der Massen, auch wenn sich der Massendefekt auf riesige 450 Milliarden Kilogramm beläuft. Erst bei Atomkernen wird der Massendefekt messbar und beträgt für die meisten Atomkerne 7 bis 9 $\frac{\text{MeV}}{c^2}$ pro Nukleon, also ca. 0,8 Prozent.

In gebundenen Zuständen von (Anti-)Quarks wird der Massendefekt noch etwas ausgeprägter und beträgt mehrere Prozent der Massensumme.

Außergewöhnlich dabei ist, dass jedes (Anti-)Quark immer eine „Gluonwolke“ umgibt, deren Energie einer zusätzlichen Masse von ca. $320 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ entspricht. Die bei gebundenen Zuständen zu berücksichtigenden „Konstituenten-Quarkmassen“ $M_q = m_q + 320 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ sind daher $M_u \approx 322 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ für das Up-Quark, $M_d \approx 325 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ für das Down-Quark, $M_s \approx 420 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ für das Strange-Quark, und $M_c \approx 1600 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ für das Charm-Quark.

Um die Massen der Teilchen in Tabelle 4 zu verstehen, muss man diese Konstituentenmassen addieren und dann die jeweilige Bindungsenergie abziehen. Diese ist allerdings äußerst schwierig zu berechnen und hängt zudem stark von der jeweiligen Spin-Konfiguration der (Anti-)Quarks ab. Nur beim Vergleich zwischen sehr ähnlichen Zuständen wie dem D^+ ($c\bar{d}$) und dem D_s^+ ($c\bar{s}$) ergibt sich deren Massendifferenz relativ genau aus der Differenz der Massen von Anti-Down- und Anti-Strange-Quark.

Ähnlich wie in der Atomphysik, z. B. beim Wasserstoffatom, existieren auch für Mesonen aus dem 1S-Grundzustand Radial-Anregungen, wie die 2S-, 3S- oder 4S-Zustände, oder Drehimpuls-Anregungen, wie P- oder D-Zustände. Im Gegensatz zum Wasserstoffatom können solche angeregten Mesonen wegen des Quark-Confinements auch Massen besitzen, die negativen Bindungsenergien entsprechen, ohne sofort in ihre Quark-Konstituenten zu dissoziieren. Für solche Zustände lässt sich die Erzeugung von Quark-Anti-Quark-Paaren aus der

MESON ($q\bar{q}$)	$M_q / \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$M_{\bar{q}} / \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$E_B / \frac{\text{MeV}}{c^2}$	$m_{q\bar{q}} / \frac{\text{MeV}}{c^2}$	τ / s
$D^+ (c\bar{d})$	1600	325	55	1870	$1 \cdot 10^{-12}$
$D_s^+ (c\bar{s})$	1600	420	50	1970	$5 \cdot 10^{-13}$
$J/\Psi (c\bar{c})$	1600	1600	100	3100	$7 \cdot 10^{-21}$
$\Psi_{1D} (c\bar{c})$	1600	1600	-570	3770	$2 \cdot 10^{-23}$

Tabelle 4: Konstituenten-Quarkmassen, Bindungsenergien, Gesamtmassen und mittlere Lebensdauern τ für einige Mesonen, die ein Charm-Quark enthalten

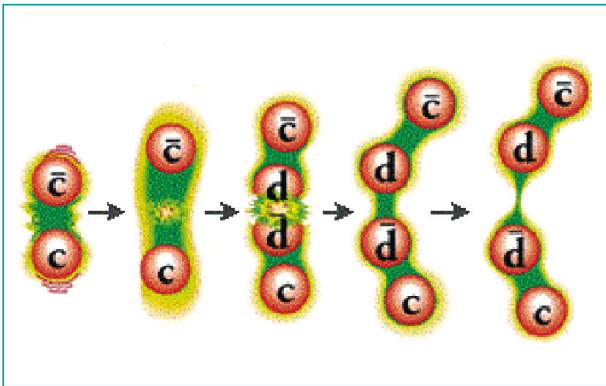


Abb. 66: Erzeugung eines Down-Anti-Down-Quark-Paares aus der potenziellen Energie des angeregten 1D-Zustands $\Psi_{1D}(c\bar{c})$ und anschließender Zerfall $\Psi_{1D}(c\bar{c}) \rightarrow D^+(c\bar{d}) + D^-(d\bar{c})$ in zwei D-Mesonen

© Particle Data Group

steigenden potentiellen Energie bei Erhöhung des mittleren Abstands zwischen Quark und Anti-Quark beobachten. Dabei müssen die Gluonwolken ebenfalls berücksichtigt werden; z. B. ist für die Erzeugung eines Paares aus d und \bar{d} -Quark eine Energie von 650 MeV nötig. Der niedrigste angeregte Zustand, für den das gerade möglich wird, ist $\Psi_{1D}(c\bar{c})$ mit einer Masse von $3770 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, also $670 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ oberhalb des im 1S-Zustand befindlichen $J/\Psi(c\bar{c})$, siehe Abb. 66.

Während sich das $J/\Psi(c\bar{c})$ vorwiegend über die vollständige Vernichtung der (Anti-)Charm-Quarks in Gluonen und anschließende Erzeugung leichter Quark-Anti-Quark-Paare umwandelt, verkürzt sich die Lebensdauer des $\Psi_{1D}(c\bar{c})$ durch diese zusätzliche Zerfallsmöglichkeit ohne Vernichtung der (Anti-)Charm-Quarks um einen Faktor 300 auf $2 \cdot 10^{-23}$ s. Die zunächst in den D-Mesonen weiter vorhandenen Charm-(Anti-)Quarks wandeln sich erst viel später nach einer Lebensdauer von ca. 10^{-12} s über die schwache Wechselwirkung in (Anti-)Strange-Quarks um.

Kovalente Quarkpaarbindung

In Kapitel 2.2.3 wird erwähnt, dass die kovalente Quarkpaarbindung kurzzeitig stattfindet. In der Tat geschieht das ganz spontan, denn der Kern ist einem freien Nukleonengas ähnlich, in dem es keine

festen Nachbarn gibt. In einem zur Quarkpaarbindung äquivalenten Bild lässt sich die Nukleon-Nukleon-Bindung durch Austausch von Pionen und anderen Mesonen beschreiben). Der Pion-Austausch (siehe Abb. 67) wurde 1935 von Hideki Yukawa eingeführt, der das erst 1947 entdeckte Pion als Austauschteilchen der Kernkraft postulierte.

Feynman-Diagramme als Ladungsflussdiagramme am Beispiel des Pion-Austausch

Da bei allen in der Natur ablaufenden Prozessen stets sämtliche Ladungen erhalten sein müssen und diese Prozesse mit Feynman-Diagrammen visualisiert und beschrieben werden, ist für jede Ladungsart die Summe der entsprechenden Ladungen der beteiligten Teilchen in Feynman-Diagrammen eine zeitliche Konstante. Wie sich die Ladungen auf die Teilchen verteilen, kann jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Prozesses verschieden sein, je nachdem, welche Teilchenumwandlungen stattfinden bzw. ob Teilchen erzeugt oder vernichtet werden. Unter diesem Gesichtspunkt können Feynman-Diagramme auch als Ladungsfluss-Diagramme interpretiert werden. Dies lässt sich anhand der Farbladungen beim Pion-Austausch veranschaulichen (siehe Abb. 68). Die Farbladungen bieten sich als Beispiel an, da sich diese Ladungen leicht visualisieren lassen. Elektrische und auch schwache Ladung ließen sich jedoch analog betrachten. In dieser Darstellung lässt sich der „Fluss“ einer Farbladung vom Beginn bis zum Ende des Prozesses nachvollziehen. So wird unmittelbar deutlich, dass insgesamt und zu jedem Zeitpunkt die Summe der Farbladungsvektoren konstant ist. Es findet lediglich eine Verlagerung der Farbladungen zwischen den Quarks statt, welche durch die Gluonen bewerkstelligt wird. Bei den Farbladungen der Gluonen in Abb. 68 ist nicht gekennzeichnet, bei welcher der beiden Farbladungen es sich um die Farbe und bei welcher es sich um die Anti-Farbe handelt. Dies lässt sich jedoch leicht durch Überprüfung der Farbladungserhaltung an den entsprechenden Vertices nachvollziehen. Welche der beiden Farbladungen als Farbe bzw. Anti-Farbe aufgefasst werden muss, ist zudem auch davon abhängig,

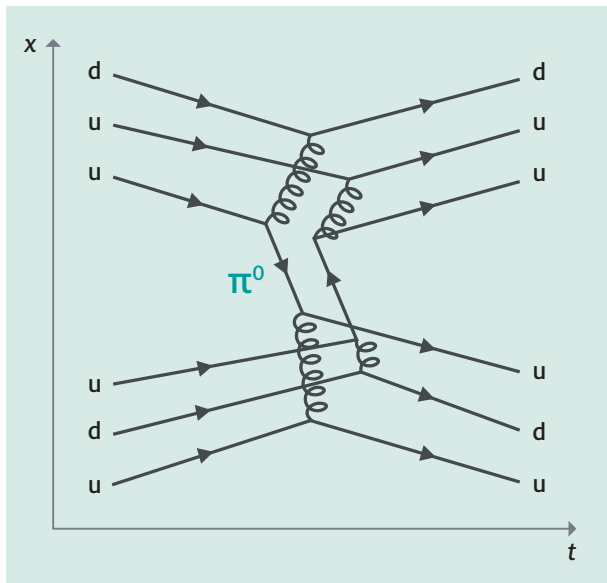


Abb. 67: Feynman-Diagramm des Pion-Austauschs zwischen zwei Nukleonen

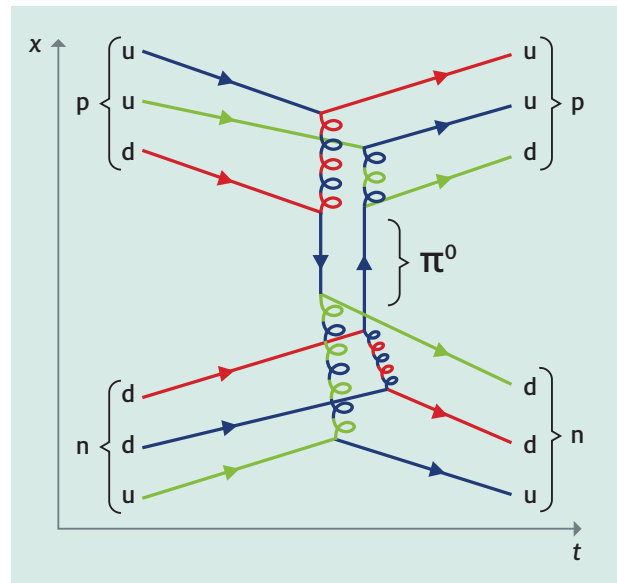


Abb. 68: Feynman-Diagramm des Pion-Austauschs als Flussdiagramm der starken Farbladung.

(Copyright: Fred the Oyster, Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz CC BY-SA 4.0, URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn_Scatter_Quarks.svg)

ob es sich um einen Vertex der Gluon-Emission oder -Absorption handelt. Da die zeitliche Abfolge der Wechselwirkungen im Inneren von Feynman-Diagrammen auf Grund von Unbestimmtheitsrelationen nicht eindeutig definiert bzw. auch abhängig vom Bezugssystem ist, bleibt es eine reine Definitionsfrage, was Farbe und was Anti-Farbe ist. Die Unbestimmtheit der zeitlichen Abfolge innerer Prozesse wurde im vorliegenden Feynman-Diagramm durch den vertikalen Verlauf der obigen beiden Gluonen dargestellt.

Generationsübergreifende Teilchenumwandlungen

In Kapitel 2.5.1 wurde festgehalten, dass prinzipiell keine direkten Umwandlungen zwischen Materieteilchen unterschiedlicher Generationen stattfinden. In seltenen Fällen ist dies allerdings aufgrund quantenmechanischer Effekte möglich, die im Fachtext nicht diskutiert wurden. Derartige Umwandlungen werden durch quantenmechanische Mischung von Teilchen gleicher Ladungen verursacht, die mit der Erzeugung ihrer Massen zusam-

menhängen. Ein Beispiel dafür sind die sogenannten Neutrinooszillationen⁷⁰. Ein Neutrino ist stets eine quantenmechanische Mischung aus Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino. Darüber, welches Neutrino bei der Messung bzw. Beobachtung vorliegt, können lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden.

Ein weiteres Beispiel sind die d-, s- und b-Quarks (bzw. ihre Anti-Quarks). Auch bei diesen handelt es sich um quantenmechanische Mischungen aus diesen jeweils gleich geladenen Quarks, welche sich in unterschiedlichen Teilchengenerationen befinden. Der quantenmechanische Masseneigenzustand, der in gebundenen Zuständen „Strange-Quark“ genannt wird, ist beispielsweise gemischt aus Ladungseigenzuständen von 94,7 % Strange-Quark, 5,1 % Down-Quark und 0,2 % Bottom-Quark, wie sie in den Ladungsmultipletts vorkommen. Die Umwandlung des Strange-Quark-Masseneigenzustands in ein Up-Quark durch Emission oder Absorption eines W-Teilchens geschieht nur über seinen 5,1 %-igen Down-Quark Anteil und verläuft entsprechend

⁷⁰ Für ihre Forschung zu Neutrinooszillationen erhielten Raymond Davis Jr. und Masatoshi Koshiba 2002 den Nobelpreis für Physik. Für den direkten Nachweis dieser Oszillationen und damit auch für den Nachweis, dass die drei Neutrinos unterschiedliche Massen besitzen, erhielten Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald 2015 den Nobelpreis für Physik.

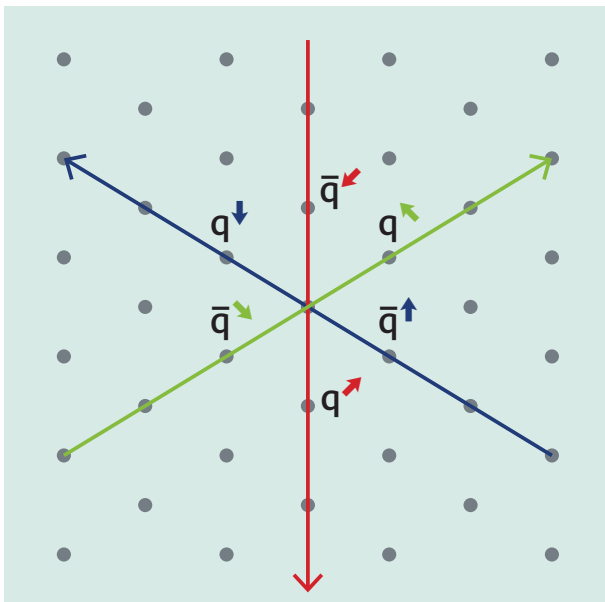
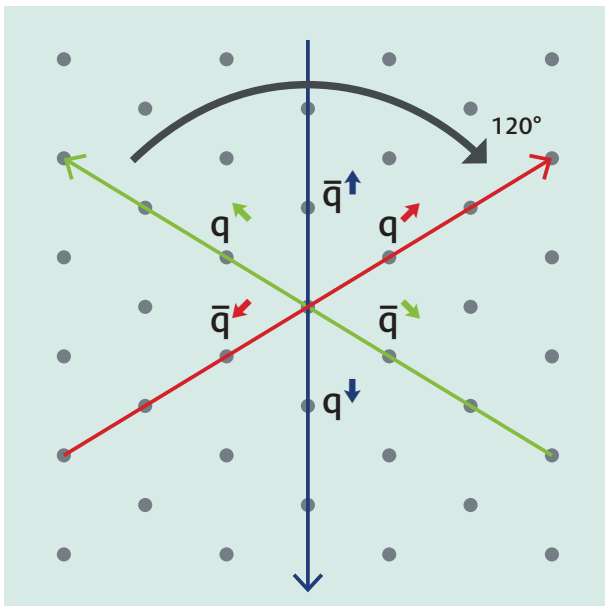


Abb. 69: Eine Drehung des Farbgitters um 120° ergibt eine identische Anordnung von Quarks, allerdings mit anderen Farbladungen. Denselben Effekt erhält man, wenn jedes der Quarks ein Gluon abstrahlt. So wird aus dem roten Quark q^{rot} durch Abstrahlung eines rot-anti-grünen Gluons $g^{\text{rot-anti-grün}}$ ein grünes Quark $q^{\text{grün}}$.

langsam mit einer mittleren Lebensdauer von etwa $5 \cdot 10^{-8}$ Sekunden. Das Strange-Quark ist das leichteste Quark der zweiten Generation, so dass es ohne generationsübergreifende Teilchenumwandlungen aus Energieerhaltungsgründen als stabiles Teilchen in Nukleonen neuartiger stabiler Materie (strange matter) vorkommen müsste⁷¹.

Lokale Eichsymmetrien erfordern

Wechselwirkungen

Die Eichsymmetrien des Standardmodells fordern die Unabhängigkeit der physikalischen Gesetze von „Eichtransformationen“ der Ladungen, z. B. also davon, welche der starken Ladungen man nun als „rot“, „grün“ oder „blau“ bezeichnet, oder was man positive und was negative schwache Ladung nennt.

Die Eichsymmetrien des Standardmodells sind darüber hinaus sogar lokale Symmetrien, d. h. die physikalischen Grundgesetze erlauben Drehungen des Ladungs-Koordinatensystems (also Umeichungen der Ladungen) an jedem Ort und zu jeder Zeit unabhängig voneinander (siehe auch Kapitel 2.7.2 über den Brout-Englert-Higgs-Mechanismus). Abb. 69 zeigt schematisch, dass eine Eichtransformation (Beispiel: Rotation um 120°) im Raum der starken Ladung (Farbladungsgitter) denselben Effekt hat wie die Abstrahlung eines Gluons.

Man kann mathematisch streng herleiten, dass ohne Einführung lokaler Wechselwirkungen in Form von Botenteilchen (in diesem Beispiel Gluonen) eine lokale Eichsymmetrie für die Ladungen nicht erreichbar ist. Um solche Symmetrien zu erfüllen, muss die Natur Wechselwirkungen über Botenteilchen erlauben. Dies ist die grundlegende Erkenntnis des Standardmodells. Analog zum obigen Beispiel kann die Existenz der Botenteilchen der schwachen bzw. elektrischen Ladung ebenfalls aus Symmetrioperationen in den entsprechenden Ladungsräumen hergeleitet werden.

Zur quantitativen Behandlung der Symmetrien ist die mathematische Theorie der Symmetriegruppen nötig. Eine systematische Behandlung ist daher in

⁷¹ Möglich wäre auch eine alternative Definition der Eigenzustände, in der sich dann die u-, c- und t-Quarks und ihre Anti-Quarks als quantenmechanische Mischungen ergeben. Dann wären gebundene Strange-Quarks zu 100 % Eigenzustände im schwachen Ladungsmultipllett, könnten sich aber trotzdem in Up-Quarks umwandeln, weil nun diese einen 5,1 %-igen Anteil von Charm-Quarks enthalten.

der Schule unmöglich⁷². Da die Symmetrien des Standardmodells aber eine hohe Eleganz und Erklärungsbreite besitzen, ist es ggfls. trotzdem lohnend, in Stufe 3 des Spiralcurriculums zumindest als Ausblick Folgendes zu erwähnen, um bei den Schülern weitere Faszination an Physik hervorzurufen:

- (i) Die Symmetrien des Standardmodells spiegeln sich in den Teilchenmultipletts wider, innerhalb derer die Teilchen durch Drehung der Farbladungsachsen oder durch Vorzeichenwechsel der schwachen bzw. elektrischen Ladung ineinander überführt werden können, und dienen damit als Ordnungsprinzip für Teilchen.
- (ii) Ohne die Existenz von Wechselwirkungen und Botenteilchen könnte das Standardmodell diese Symmetrien nicht erfüllen, da die Umwandlung von Teilchen innerhalb eines Multipletts nur über Botenteilchen bewerkstelligt werden kann.
- (iii) Mit drei Symmetrien, den drei zugehörigen Kopplungsparametern, dem (Brout-Englert-Higgs-) Massenmechanismus und der gravitativen Wechselwirkung sind alle bisher im Universum beobachteten Prozesse vollständig erklärbar.

Ohne Ladungen und die mit ihnen verbundenen Ladungssymmetrien ist es also weder möglich, Ordnung in die Elementarteilchen zu bringen, noch deren Wechselwirkungen zu verstehen oder die Geschichte des Universums in der Kosmologie zu beschreiben. Dies verdeutlicht noch einmal die zentrale Rolle der Ladungen im Standardmodell.

Mathematische Darstellungen lokaler Eichsymmetrien

Abschließend seien die mathematischen Bezeichnungen der Symmetriegruppen des Standardmodells erwähnt, um für sehr interessierte Lehrkräfte die Verbindung des Fachtextes zu universitären und vor allem theoretischen Lehrbüchern zu schaffen.

Wie in den fachlichen Hinweisen und im Verlauf des Fachtextes mehrfach erwähnt, liegt die Grundidee des Standardmodells in drei Ladungssymmetrien. In der mathematischen Sprache der Gruppentheorie schreibt man dies als Produkt dreier Symmetriegruppen, von denen nach der Brechung durch den Brout-Englert-Higgs-Mechanismus noch zwei ungebrochene Symmetrien verbleiben:

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_I \otimes U(1)_{Z-I(3)} \xrightarrow{\text{Brout-Englert-Higgs Symmetriebrechung}} SU(3)_C \otimes U(1)_Z$$

Hierbei bezeichnet $SU(3)_C$ die Symmetriegruppe der starken Wechselwirkung, $SU(2)_I \otimes U(1)_{Z-I(3)}$ die Symmetriegruppe der miteinander vermischten elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung, und $U(1)_Z$ die Symmetriegruppe der elektromagnetischen Wechselwirkung⁷³. Alle diese Gruppen sind Matrizen­gruppen, für die die Zahl (n) in Klammern hinter dem Gruppennamen angibt, dass die einfachste („nicht mehr reduzible“) Darstellung dieser Gruppe $n \times n$ -Matrizen sind. Mit Hilfe solcher Matrizen lassen sich Drehungen im Ladungsraum mathematisch darstellen. Die eindrucksvolle Vorhersagekraft des Standardmodells wird vor allem von zwei Aspekten bestimmt:

- (i) Für auf der jeweiligen Gruppe beruhende lokale Eichsymmetrien sagt die Zahl der voneinander unabhängigen Drehungen im Ladungsraum genau die Zahl der für diese Wechselwirkung nötigen Botenteilchen vorher. Für die Gruppe $SU(2)_I$ erhält man z. B. drei unabhängige Drehungen (ähnlich zu den drei Eulerschen Winkeln bei räumlichen Drehungen um die drei Achsen $I^{(1)}$, $I^{(2)}$ und $I^{(3)}$ und damit die Vorhersage von drei Botenteilchen: W^- , Z und W^+ . Für die $U(1)_Z$ ergeben sich analog ein Botenteilchen und für die $SU(3)_C$ acht Botenteilchen mit genau vorhergesagten Ladungen. Die Anzahl und Eigenschaften der Botenteilchen sind also eindeutig durch die jeweilige Symmetriegruppe definiert.

⁷² Eine ergänzende Literatur über Eichsymmetrien auf auch für interessierte Schüler zugänglichem Niveau bildet das Buch G. D. Coughlan, James Dodd, "Elementarteilchen: Eine Einführung für Naturwissenschaftler", Springer-Verlag, 2013.

⁷³ Gut verständliche Erklärungen der Definition und mathematischen Bedeutung der Symmetriegruppen $SU(3)_C$, $SU(2)_I$ und $U(1)_Z$ finden sich im Kapitel 4: „Symmetrien“ von Griffiths, Einführung in die Elementarteilchenphysik, Akademie Verlag, 1996 (neuere Auflagen nur in Englisch). Dort wird auch die Anwendung der $SU(2)_I$ auf Drehimpulse und Spins diskutiert.

- (ii) Alle Materieteilchen lassen sich in Ladungs-Multipletts dieser Gruppen anordnen. Innerhalb (und nur innerhalb) dieser Multipletts können sich Teilchen durch Emission oder Absorption von Botenteilchen ineinander umwandeln. Experimentell findet man, dass alle Multipletts bezüglich der jeweiligen Ladungssymmetrien ebenfalls jeweils n Mitglieder haben (also Singulett mit $n = 1$ für $U(1)_Z$, Dupletts mit $n = 2$ für $SU(2)_F$ und Tripletts mit $n = 3$ für $SU(3)_C$). Dies ist die einfachste Möglichkeit (die sog. „fundamentale Darstellung“), die allerdings keineswegs zwingend so sein müsste. Das Theoriegebäude des Standardmodells kann für Materieteilchen – im Gegensatz zu den Botenteilchen – nur vorhersagen, welche Multipletts es prinzipiell geben könnte, jedoch weder die Anzahl der in ihnen enthaltenen Teilchen, noch die Anzahl der Generationen solcher Multipletts. Diese Informationen muss das Experiment beisteuern.

Zustandekommen der diskreten Ladungszahlen/-vektoren

Im Fachtext wurden die diskreten Ladungszahlen bzw. -vektoren der elektrischen, schwachen und starken Ladung eingeführt. Es wurde nicht geklärt, wieso genau die beobachteten Ladungswerte vorkommen. Dies ist so allgemein auch nicht möglich. Bei der elektrischen Ladung gehen die beobachteten Ladungszahlen nicht direkt aus dem Standardmodell hervor. Die elektrische Ladung besitzt die Besonderheit, dass die elektrische Ladungszahl eines Elektrons willkürlich auf $Z_{e^-} = -1$ gesetzt worden ist. Dies beeinflusst auch den Wert von α_{em} . Würde man z. B. eine neue Elementarladung $e' = \frac{1}{3} e$ definieren, so würde sich für die neue elektrische Ladungszahl eines Elektrons $Z'_{e^-} = -3$ und z. B. für das Down-Quark eine neue elektrische Ladungszahl von $Z'_d = -1$ ergeben. Der neue Wert des elektromagnetischen Kopplungsparameters würde dann $\alpha'_{em} \approx \frac{1}{3^2 \cdot 137}$ betragen.

Die kleinste Einheit der starken und schwachen Ladung hingegen wird durch deren Symmetriegruppe aus der mathematischen Gruppentheorie festgelegt. Dadurch werden bei schwacher und starker Ladung auch alle möglichen Ladungswerte durch die Symmetriegruppe vorhergesagt. So sind z.B. die schwachen Ladungszahlen des Elektrons und des Elektron-Neutrinos $I_{e^-} = -\frac{1}{2}$ und $I_{\nu_e} = +\frac{1}{2}$ durch die Symmetriegruppe der schwachen Wechselwirkung festgelegt.

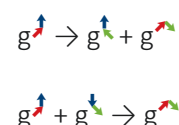
Multipletts der Botenteilchen

Nicht nur die Materieteilchen, sondern auch die Botenteilchen ordnen sich in Multipletts bezüglich der Ladungssymmetrien. Hier sagen die Symmetrien sogar genau vorher, wie diese Multipletts aussehen müssen: ein Singulett für das Photon der elektromagnetischen Wechselwirkung, ein Triplet für die Botenteilchen (W^- , Z , W^+) der schwachen Wechselwirkung und ein Oktett für die Gluonen der starken Wechselwirkung. Ähnlich wie bei den Materieteilchen sind durch Emission oder Absorption von Botenteilchen Umwandlungen innerhalb dieser Multipletts möglich, wie z. B. für das W^- :



In jedem Fall muss in allen diesen Prozessen (mindestens) eines der beteiligten Teilchen virtuell („off-shell“) sein, da sonst die Energie-Impulserhaltung nicht erfüllt sein kann. Das obige Beispiel lässt sich durch einen W - W - Z -Vertex darstellen. Einen Z - Z - Z -Vertex gibt es jedoch nicht, da $I_Z = 0$ und $Z_Z = 0$ sind, genauso wenig wie einen γ - γ - γ -Vertex, da $Z_\gamma = 0$ ist.

Analoge Umwandlungen durch Emission oder Absorption eines Gluons können innerhalb des Gluon-Okts erfolgen, wie zum Beispiel:



4 AUFGABEN

Im Folgenden sind einige Aufgaben aufgeführt, die im Unterricht bei der Behandlung der Elementarteilchenphysik und des Standardmodells eingesetzt werden können.

1. Masse des Photons

Begründe mit Hilfe einer Dir bekannten Gleichung, warum das Photon keine Masse besitzen kann.

Hinweis: Die elektromagnetische Wechselwirkung besitzt eine unendliche Reichweite.

2. Folgen einer endlichen Reichweite von Photonen

Nenne einige Auswirkungen z. B. für den Aufbau von Materie, für lebensfreundliche Bedingungen auf der Erde oder für die von Menschen benutzte Technik, wenn Photonen keine unendliche Reichweite hätten. Diskutiere dazu die folgenden angenommenen Reichweiten von Photonen:

- a) $\lambda_\gamma < 10^8 \text{ km}$
- b) $\lambda_\gamma < 10 \text{ km}$
- c) $\lambda_\gamma < 1 \text{ m}$
- d) $\lambda_\gamma < 10^{-9} \text{ m}$
- e) $\lambda_\gamma < 10^{-10} \text{ m}$

3. Potenzielle Energie eines Elektrons aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem anderen Elektron

- a) Skizziere qualitativ die potenzielle Energie eines Elektrons, welche dieses aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem weiteren Elektron besitzt als Funktion des Abstandes r zwischen den Elektronen.
- b) Beschreibe die Änderung der potentiellen Energie des Elektrons, wenn der Abstand zum zweiten Elektron vergrößert bzw. verkleinert wird.
- c) Beschreibe die Änderung der Kraft zwischen den Elektronen bei sich vergrößerndem bzw. sich verkleinerndem Abstand.

4. Potenzielle Energie eines Elektrons aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem Positron

Skizziere qualitativ die potenzielle Energie eines Elektrons, welche dieses aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem Positron besitzt als Funktion des Abstandes r zwischen Elektron und Positron.

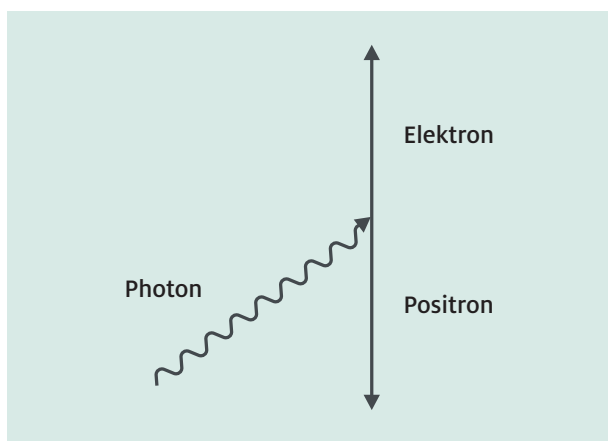
5. Photonen aus Paarvernichtung eines Elektrons und eines Positrons

- a) Bei der β^+ -Umwandlung eines Atomkerns entsteht ein Positron e^+ , das Anti-Teilchen des Elektrons. Bewegt sich dieses Positron durch Materie, wird es zunächst abgebremst. Sobald es nach wenigen Millimetern langsam genug ist, wird es von einem Elektron „eingefangen“ und es kommt zur Paarvernichtung, wobei Strahlung in Form zweier Photonen entsteht. Diesen Prozess macht man sich bei der Positronen-Emissions-Tomografie (PET), einem hochmodernen bildgebenden Verfahren der diagnostischen Medizin, zunutze. Berechne die Energie der beiden Photonen, die bei der Paarvernichtung entstehen. Das Positron ist dabei so langsam, dass seine kinetische Energie vernachlässigt werden kann. Berechne aus der Photonenenergie die Frequenz und die Wellenlänge der zugehörigen elektromagnetischen Strahlung.
- b) Sind diese Photonen für das menschliche Auge sichtbar? Begründe Deine Aussage!

6. Paarerzeugung eines Elektrons und eines Positrons

Begründe, warum die Elektron-Positron-Paarerzeugung aus einem Photon nur in Materie stattfinden kann.

Hinweis: Versetze Dich dafür in ein spezielles Bezugssystem, in dem das entstehende Elektron und Positron genau entgegengesetzt gerichtete, aber betragsmäßig gleich große Impulse besitzen (Schwerpunktsbezugssystem, siehe Abbildung). Das Photon bewegt sich in jedem Bezugssystem mit Lichtgeschwindigkeit. Verwende zur Begründung den Energie- und Impulserhaltungssatz.



Unmögliche Erzeugung von einem Elektron-Positron-Paar aus einem Photon, dargestellt im Schwerpunktsbezugssystem von Elektron und Positron.

7. Reichweite eines W-Teilchens

Schätze die Reichweite eines W-Teilchens aus seiner Masse ab und vergleiche die Reichweite mit der Größe von Nukleonen.

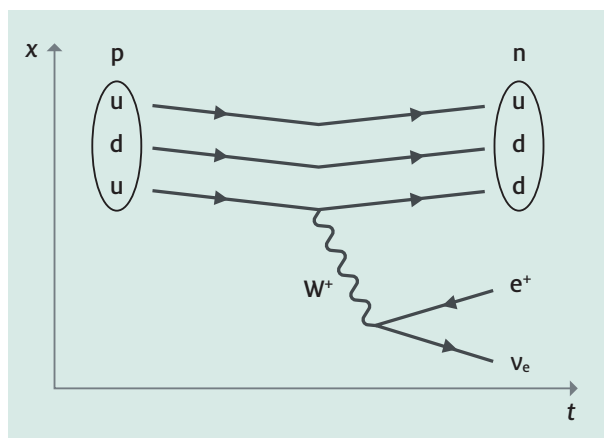
8. β^+ -Umwandlung

Begründe, warum sich ein einzelnes freies Proton nicht per β^+ -Umwandlung umwandelt.

9. Feynman-Diagramm der Streuung eines Anti-Elektron-Neutrinos an einem Proton

a) Zeichne das Feynman-Diagramm der Streuung eines Anti-Elektron-Neutrinos an einem Proton.

Gehe dabei wie folgt vor: Betrachte das folgende Feynman-Diagramm der β^+ -Umwandlung.



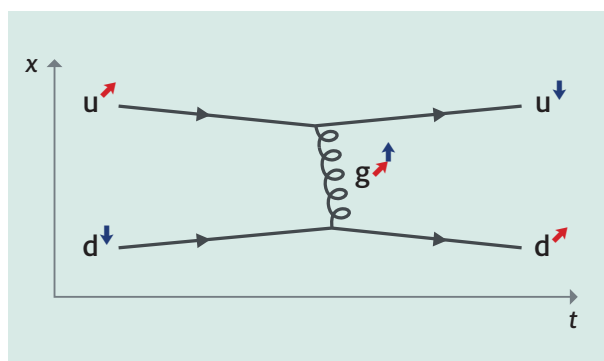
Drehe ausgehend von diesem Feynman-Diagramm die Linien der Teilchen so, dass sich der Streuprozess $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ ergibt.

b) Prüfe die drei Ladungs-Erhaltungssätze bei diesem Streuprozess.

Historische Anmerkung: Mit diesem Streu-Prozess wurden 1954 in der Nähe eines Kernkraftwerks zum ersten Mal (Anti-)Neutrinos experimentell nachgewiesen.

10. Feynman-Diagramm des Farbladungswechsels zwischen Quarks

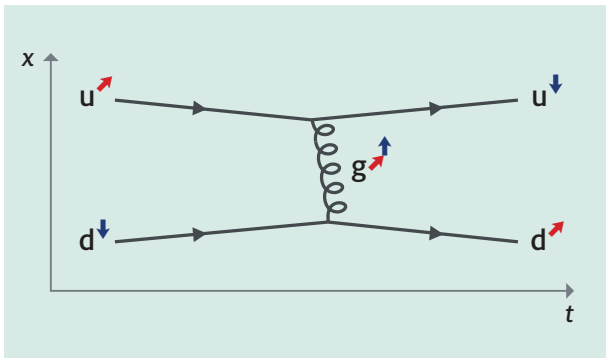
a) Überprüfe in dem folgenden Feynman-Diagramm an jedem Vertex die Farbladungserhaltung.



b) Ermittle eine weitere Möglichkeit, diesen Farbladungswechsel zu erreichen und zeichne das entsprechende Feynman-Diagramm. Von welchem Quark wird nun das Gluon emittiert und welche Farbladungen besitzt es?

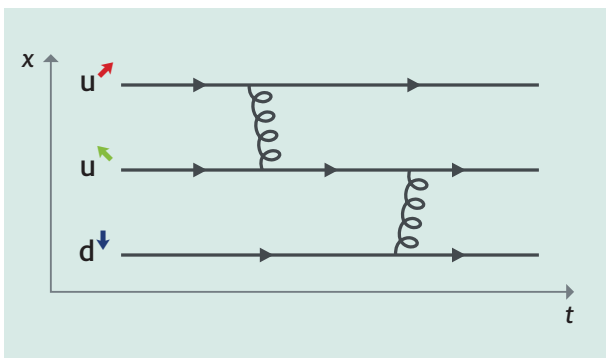
11. Feynman-Diagramm der Quark-Paarvernichtung und Quark-Paarerzeugung

Zeichne ein Feynman-Diagramm für den Prozess $u\uparrow + \bar{u}\downarrow \rightarrow \bar{d}\downarrow + d\uparrow$. Gehe dazu von dem unten stehenden Feynman-Diagramm aus. Das gesuchte Feynman-Diagramm lässt sich aus diesem durch Drehung von Quark-Linien herleiten. Beschreibe Dein Vorgehen unter Angabe der Teilchen vor und nach der Drehung.



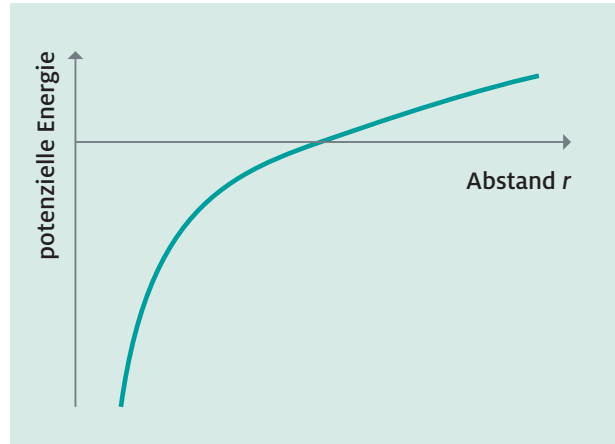
12. Feynman-Diagramm des Farbbladaustauschs zwischen Quarks in einem Proton

Die folgende Abbildung zeigt drei Quarks eines Protons. Bei jeder Emission oder Absorption eines Gluons soll sich die Farbladung des beteiligten Quarks ändern. Ergänze die fehlenden Farbladungen der Quarks bzw. Gluonen und beschreibe schrittweise den mehrfachen Farbwechsel, der aus der Emission und Absorption der Gluonen resultiert.



13. Confinement

Betrachte die folgende Abbildung der potenziellen Energie eines farbneutralen Quarksystems als Funktion des Abstands.



- Erläutere, warum beim Versuch, solche farbneutrale Quarksysteme zu trennen, aus energetischen Gründen spontan neue Quark-Antiquark-Paare entstehen können.
- Erläutere, wie daraufhin neue farbneutrale, aus Quarks zusammengesetzte Teilchen entstehen.
- Fertige eine Feldlinienskizze an, die diesen Prozess veranschaulicht.

5 LÖSUNGEN

Aufgabe 1:

Masse des Photons

Die mittlere Reichweite eines Botenteilchens und somit der zugehörigen Wechselwirkung kann mithilfe der Gleichung $\lambda = \frac{\hbar \cdot c}{m \cdot c^2}$ abgeschätzt werden, mit m : Masse des Botenteilchens und λ : Reichweite der Wechselwirkung. Damit die Reichweite einer Wechselwirkung unendlich ist, ist es daher notwendig (aber nicht hinreichend), dass die Botenteilchen masselos sind. Aus der unendlichen Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung folgt demnach, dass das Photon als Botenteilchen dieser Wechselwirkung masselos ist ($m_\gamma = 0$).

Aufgabe 2:

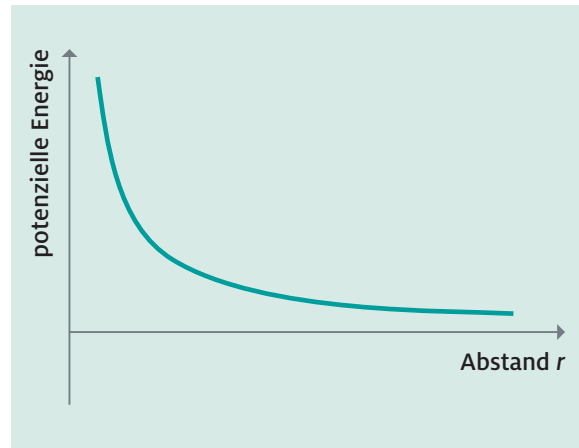
Folgen einer endlichen Reichweite von Photonen

- $\lambda_\gamma < 10^8$ km: das Licht der Sonne würde die Erde nicht mehr erreichen.
- $\lambda_\gamma < 10$ km: Funktechnologien wären nicht möglich.
- $\lambda_\gamma < 1$ m: Orientierung durch „Sehen“ in der Umgebung ist nicht möglich (auch nicht über Wärmebilder).
- $\lambda_\gamma < 10^{-9}$ m: (bio)chemische Prozesse können unter Umständen nicht ablaufen.
- $\lambda_\gamma < 10^{-10}$ m: Atome und Moleküle wären instabil.

Aufgabe 3:

Potenzielle Energie eines Elektrons aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem anderen Elektron

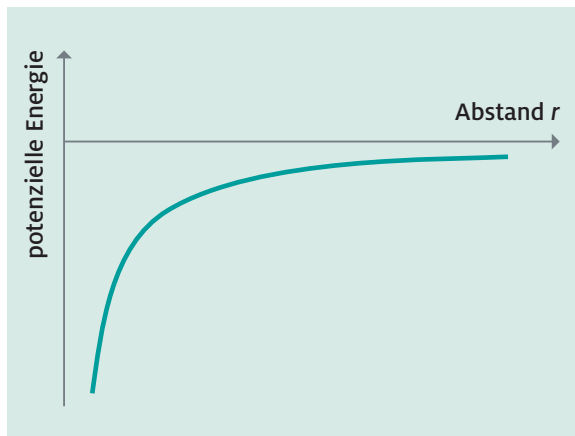
a)



- Die potenzielle Energie des Elektrons in Bezug auf das andere Elektron verringert sich mit wachsendem Abstand und strebt für sehr große Abstände ($r \rightarrow \infty$) gegen einen Grenzwert, den man üblicherweise auf Null festlegt. Verringert sich der Abstand zwischen den Elektronen, so wächst die potenzielle Energie. Für sehr kleine Abstände ($r \rightarrow 0$) strebt sie gegen unendlich.
- Der Betrag der abstoßenden Kraft zwischen den Elektronen wird bei sich vergrößerndem Abstand kleiner und strebt für sehr große Abstände ($r \rightarrow \infty$) gegen Null. Bei sich verringerndem Abstand wächst der Betrag der Kraft und strebt für sehr kleine Abstände ($r \rightarrow 0$) gegen unendlich.

Aufgabe 4:

Potenzielle Energie eines Elektrons aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung mit einem Positron

**Aufgabe 5:**

Photonen aus Paarvernichtung eines Elektrons und eines Positrons

- a) Da die kinetische Energie des Positrons vernachlässigbar ist, und das Elektron ebenfalls als ruhend angenommen werden kann sowie Elektron und Positron identische Massen besitzen, entspricht die Gesamtenergie vor der Paarzerzeugung der doppelten Ruheenergie eines Elektrons. Wie bei allen Prozessen gilt auch bei der Paarzerzeugung die Energie- und Impulserhaltung. Die zur Verfügung stehende Energie verteilt sich daher vollständig und zu gleichen Teilen auf die beiden entstehenden Photonen. Die Energie eines Photons entspricht demnach genau der Ruheenergie eines Elektrons.

$$E_\gamma = m_e \cdot c^2 = 511 \text{ keV} = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J},$$

$$f = \frac{m_e \cdot c^2}{h} = 1,24 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{s}},$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,24 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{s}}} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0,00242 \text{ nm}$$

- b) Die Wellenlänge liegt im Bereich der Gammastrahlung. Die Photonen sind somit für das menschliche Auge nicht sichtbar.

Aufgabe 6:

Paarerzeugung eines Elektrons und eines Positrons

Ein reelles Photon bewegt sich in jedem Bezugssystem mit Lichtgeschwindigkeit. Versetzt man sich in das Schwerpunktbezugssystem des Elektron-Positron-Paares, so ist der Gesamtimpuls des Elektron-Positron-Paares (d. h. die vektorielle Summe des Elektronenimpulses und des Positronenimpulses) gleich Null. Gemäß dem Impulserhaltungssatz gilt: Der Impuls des Photons ist gleich der Summe der Impulse des Elektron-Positron-Paares. Da letztere in dem gewählten Bezugssystem jedoch gleich Null ist, folgt: Der Impuls des Photons ist gleich Null. Dies ist ein Widerspruch zu der oben genannten Tatsache, dass sich das Photon in jedem Bezugssystem mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, also einen Impuls $p = \frac{E}{c}$ besitzt, der nie gleich Null ist.

Bei der in der Natur ablaufenden Elektron-Positron-Paarerzeugung ist daher immer ein weiteres Photon beteiligt, so dass der Widerspruch nicht auftritt. Tritt die Paarerzeugung innerhalb von Materie auf, so wird dieses weitere Photon beispielsweise von einem sich in der Nähe befindenden Atomkern absorbiert oder emittiert. Klassisch gesprochen, findet die Paarerzeugung nur in einem elektrischen Feld (z. B. dem eines Atomkerns) statt.

Aufgabe 7:

Reichweite eines W-Teilchens

$$\lambda_W = \frac{\hbar \cdot c}{m_W \cdot c^2} = \frac{0,197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}}{80,4 \text{ GeV}} = 2,45 \cdot 10^{-18} \text{ m} = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

Die Ausdehnung eines Nukleons beträgt ca. 1 fm.

Vergleich: Die Reichweite eines W-Teilchens ist ca. um den Faktor 400 kleiner als die typische Größe eines Nukleons.

Aufgabe 8:

β^+ -Umwandlung

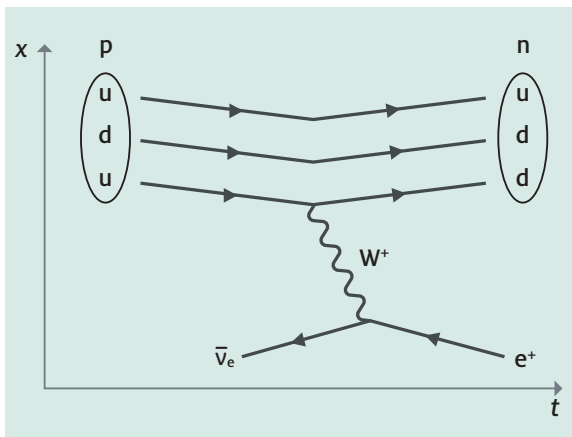
Bei der β^+ -Umwandlung wandelt sich ein Proton in ein Neutron um, wobei ein Positron und ein Elektron-Neutrino entstehen. Ein Proton besitzt eine Masse von $m_p = 938,3 \text{ MeV}$. Ein Neutron besitzt eine Masse von $m_n = 939,6 \text{ MeV}$. Da das entstehende Neutron eine größere Masse als das Proton besitzt, muss somit Energie zugeführt werden, damit die β^+ -Umwandlung stattfinden kann. Ein einzelnes, freies Proton hat keine Möglichkeit, diese Energie aus seiner Umgebung aufzunehmen. Daher kann sich ein einzelnes, freies Proton nicht per β^+ -Umwandlung umwandeln.

Anmerkung: Die Energie, die notwendig ist, damit die β^+ -Umwandlung stattfinden kann, kann beispielsweise aus Stößen mit anderen Atomkernen oder aus der Bindungsenergie eines instabilen, protonenreichen Atomkerns resultieren.

Aufgabe 9:

Feynman-Diagramm der Streuung eines Anti-Elektron-Neutrinos an einem Proton

- a) Die Linie des Elektron-Neutrinos muss nach links gedreht werden. So wird aus dem Elektron-Neutrino ein Anti-Elektron-Neutrino.



- b) Ladungserhaltung:

Elektrische Ladungszahlen:

Zu prüfen:

$$\begin{aligned} Z_p + Z_{\bar{\nu}_e} &= Z_n + Z_{e^+} \\ +1 + 0 &= 0 + 1 \\ +1 &= +1 \end{aligned}$$

Die elektrische Ladung ist erhalten.

Schwache Ladungszahlen:

Zu prüfen:

$$\begin{aligned} I_p + I_{\bar{\nu}_e} &= I_n + I_{e^+} \\ +\frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \\ 0 &= 0 \end{aligned}$$

Die schwache Ladung ist erhalten.

Starke Farbladungsvektoren:

Zu prüfen:

$$\begin{aligned} \vec{C}_p + \vec{C}_{\bar{\nu}_e} &= \vec{C}_n + \vec{C}_{e^+} \\ \vec{0} + \vec{0} &= \vec{0} + \vec{0} \\ \vec{0} &= \vec{0} \end{aligned}$$

Die starke Ladung ist erhalten.

Aufgabe 10:

Feynman-Diagramm des Farbladungswechsels zwischen Quarks

- a) Oberer Vertex:

Zu prüfen:

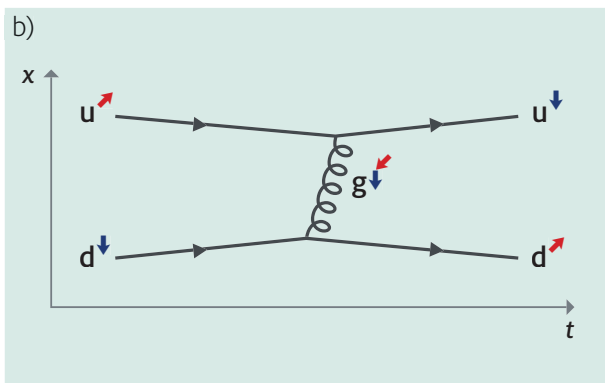
$$\begin{aligned} \vec{C}_{u\uparrow} &= \vec{C}_{g\uparrow} + \vec{C}_{u\downarrow} \\ \uparrow &= \uparrow + \downarrow \\ \uparrow &= \uparrow \end{aligned}$$

Unterer Vertex:

Zu prüfen:

$$\begin{aligned} \vec{C}_{d\downarrow} + \vec{C}_{g\uparrow} &= \vec{C}_{d\uparrow} \\ \downarrow + \uparrow &= \uparrow \\ \uparrow &= \uparrow \end{aligned}$$

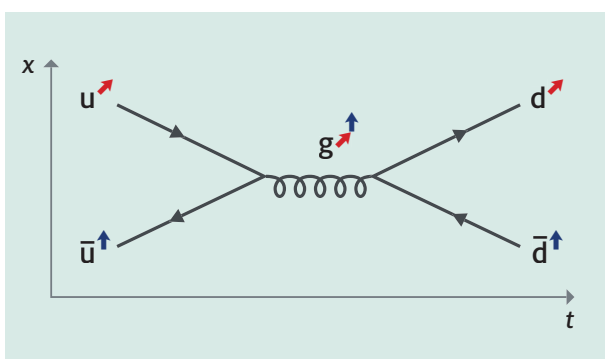
An beiden Vertices ist die Farbladung erhalten.



Das Gluon g (Farbladung blau und anti-rot) wird vom Down-Quark d emittiert und danach vom Up-Quark u absorbiert.

Aufgabe 11:

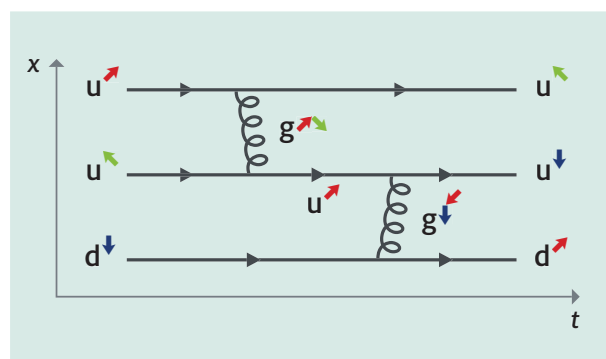
Feynman-Diagramm der Quark-Paarvernichtung und Quark-Paarerzeugung



Die Linie des Down-Quarks d muss nach rechts gedreht werden. So wird aus dem Down-Quark d das Anti-Down-Quark \bar{d} . Die Linie des Up-Quarks u muss nach links gedreht werden. So wird aus dem Up-Quarks u das Anti-Up-Quark \bar{u} .

Aufgabe 12:

Feynman-Diagramm des Farbladaustauschs zwischen Quarks in einem Proton



Das erste Gluon g besitzt die Farbladung rot-anti-grün. Die Emission bzw. Absorption dieses Gluons führt dazu, dass die beiden beteiligten Up-Quarks u und u die Farbe wechseln: Das Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor u wird durch die Emission des Gluons zu einem Up-Quark mit grünem Farbladungsvektor u und umgekehrt wird das Up-Quark mit grünem Farbladungsvektor u durch die Absorption des Gluons zu einem Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor u .

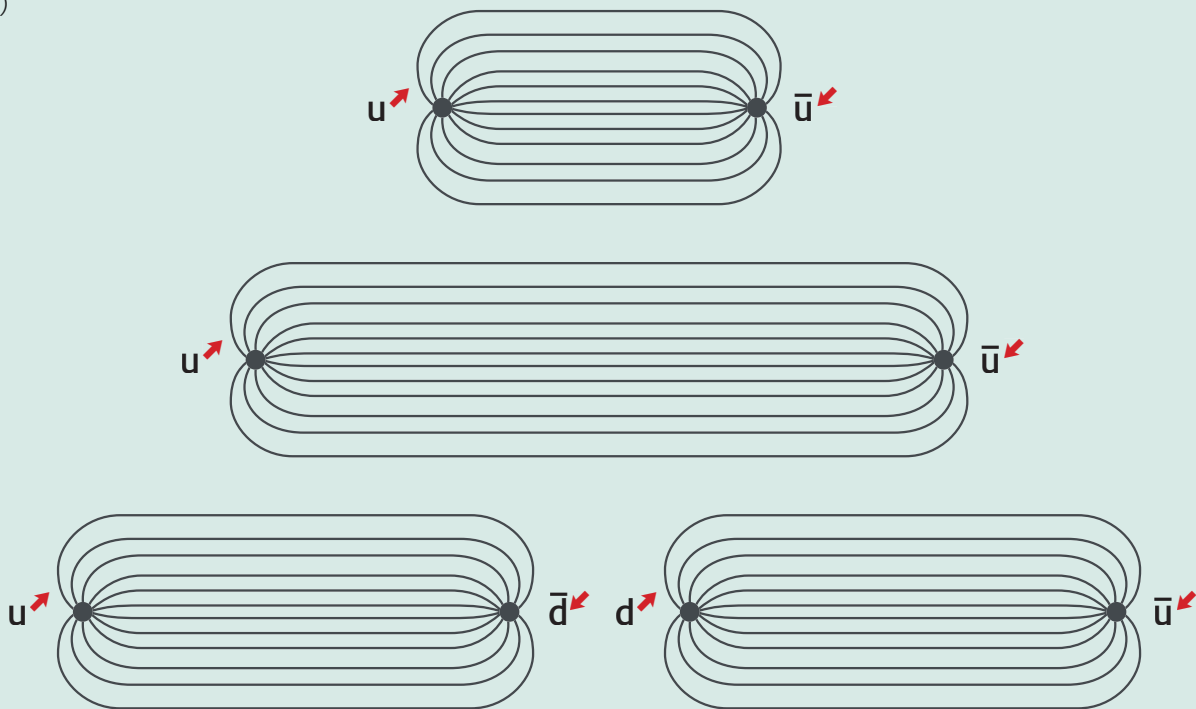
Das zweite Gluon g besitzt die Farbladung „blau-anti-rot“. Beim Austausch dieses Gluons wechseln die beiden beteiligten Quarks, das Up-Quark mit rotem Farbladungsvektor u und das Down-Quark mit blauem Farbladungsvektor d , die Farbe: Das Up-Quark u wird zu einem Up-Quark u und das Down-Quark d zu einem Down-Quark d .

Aufgabe 13:**Confinement**

a) Anhand der Abbildung erkennt man, dass für große Abstände die potenzielle Energie der Quarks mit sich vergrößerndem Abstand linear ansteigt. Das bedeutet, dass unendlich viel Energie notwendig ist, um die beiden Quarks unendlich weit voneinander zu entfernen. Ab einem gewissen Abstand ist die potenzielle Energie der Quarks so groß, dass ein neues Quark-Anti-Quark-Paar erzeugt werden kann.

b) Aufgrund der Farbladungserhaltung besitzt das entstandene Quark-Anti-Quark-Paar insgesamt die Farbladung $\vec{0}$, d. h. das entstehende Anti-Quark besitzt die zu der Farbe des entstehenden Quarks entsprechende Anti-Farbe. Ein stabiler Zustand wird erreicht, wenn das entstandene Quark und Anti-Quark Farbladungsvektoren dergestalt besitzen, dass diese mit den ursprünglichen (Anti-)Quarks zusammengesetzte Teilchen bilden können, die alle ihrerseits farbneutral sind (Confinement). Dies ist der energetisch günstigste Zustand, da dann keine lang ausgedehnten „Farbschläuche“ mehr vorliegen. Es werden daher so lange neue Quark-Anti-Quark-Paare gebildet, bis dieser Zustand erreicht ist.

c)



6 ERGÄNZENDE MATERIALIEN

5.1 Forum

Geschütztes Forum zum Unterrichtsmaterial

<https://forum.teilchenwelt.de/>

5.2 Weitere Aufgaben- und Arbeitsblätter

Eine Sammlung weiterer Aufgaben- und Arbeitsblätter ist online unter www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/kontextmaterialien-fuer-lehrkraefte/ zugänglich.

5.3 Teilchenphysik

Material auf LEIFIphysik

www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik

Nach Kategorien/Medienart bzw. Themen sortierte Sammlung von Literatur und Links zur Teilchenphysik

www.teilchenwelt.de/material/linksammlung-zur-teilchenphysik-nach-kategorien-sortiert/

www.teilchenwelt.de/material/linksammlung-zur-teilchenphysik-nach-themen-sortiert/

5.4 Elementarteilchen

Elementarteilchen-Steckbriefe

www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/teilchensteckbriefe/

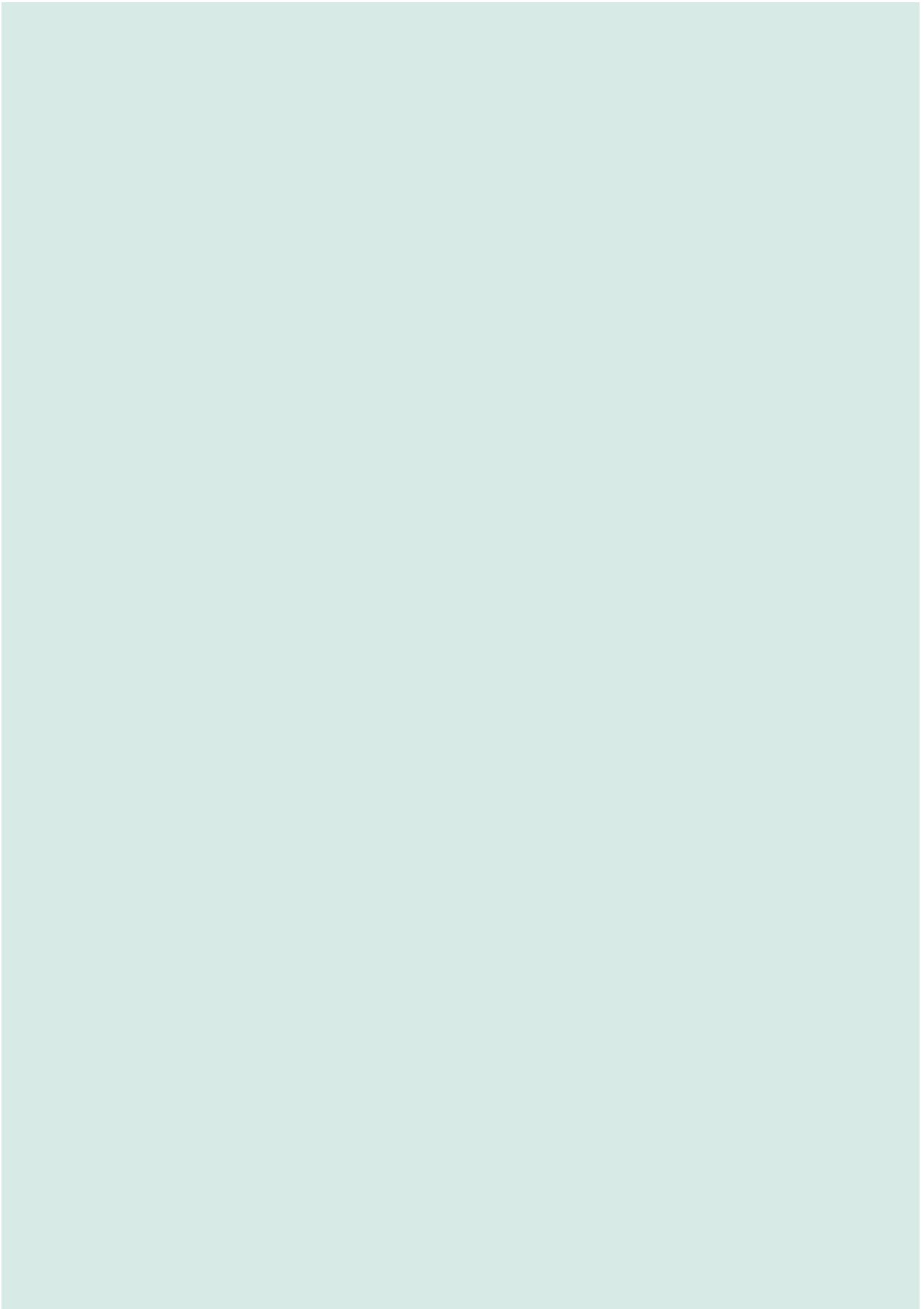
Arbeiten mit Elementarteilchen-Steckbriefen mithilfe interaktiver Tafeln

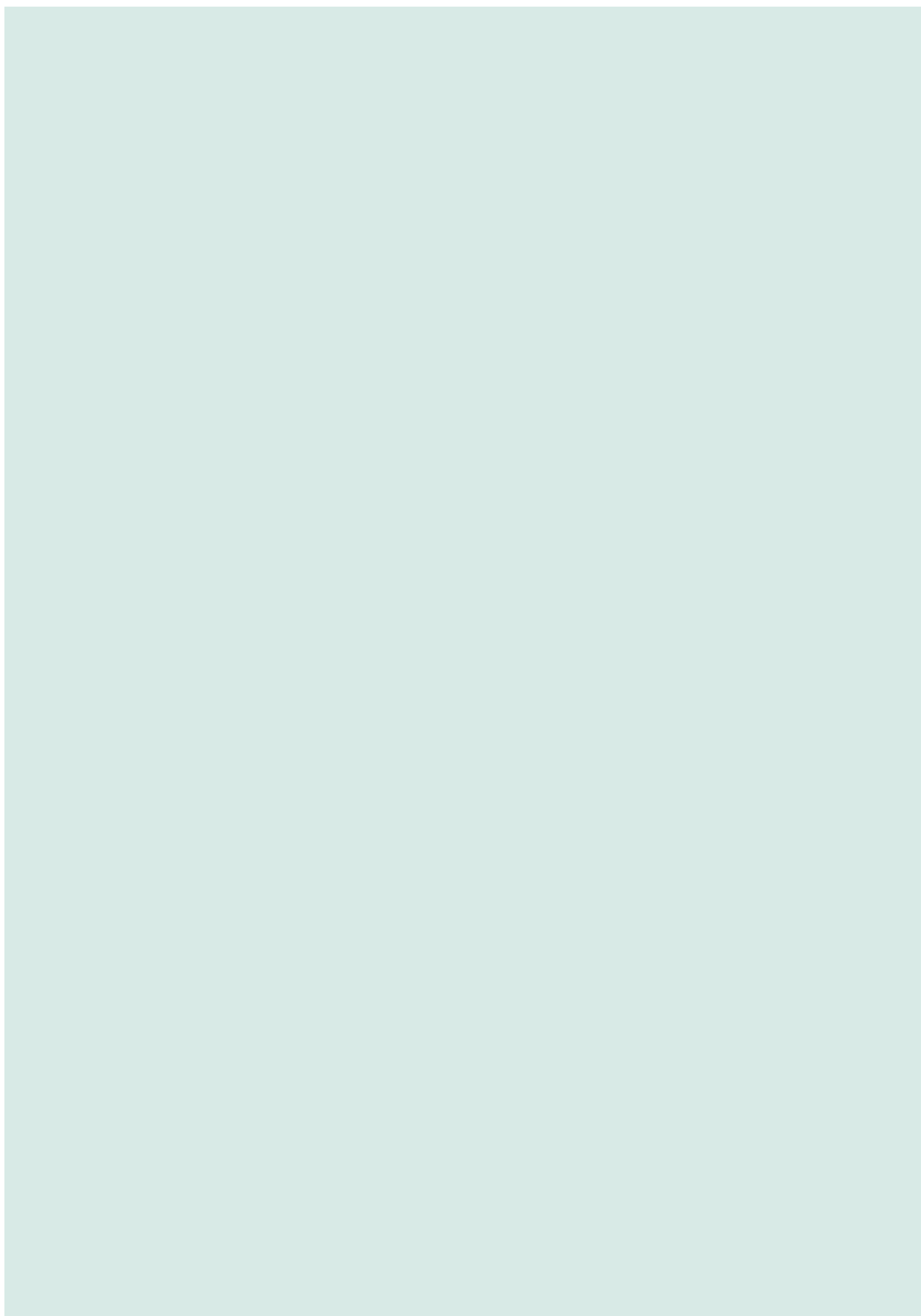
https://iktp.tu-dresden.de/IKTP/pub/15/MasterArbeit_Felix_Lehmann_2015_STEX.pdf

5.5 Feynman-Diagramme

Programm zum Zeichnen von Feynman-Diagrammen

<http://jaxodraw.sourceforge.net/>





DIE JOACHIM HERZ STIFTUNG

Die gemeinnützige Joachim Herz Stiftung arbeitet überwiegend operativ und ist vorrangig in den Themenfeldern Naturwissenschaften, Wirtschaft sowie Persönlichkeitsbildung tätig. In diesen drei Bereichen werden auch kleine, innovative Projekte Dritter gefördert. Seit 2017 unterstützt die Stiftung zudem Forschungsprojekte in den Themenfeldern Medizin und Recht. Die Joachim Herz Stiftung wurde 2008 errichtet und gehört zu den großen deutschen Stiftungen. **www.joachim-herz-stiftung.de**

Der Programmbereich Naturwissenschaften führt Kinder und Jugendliche an die Naturwissenschaften heran und fördert den wissenschaftlichen Nachwuchs auf dem Weg in die Wissenschaftskarriere. Denn naturwissenschaftliche Allgemeinbildung und das Interesse an neuen Forschungsfragen sind Voraussetzungen für individuelle Urteilsfähigkeit und gesellschaftliche Weiterentwicklung.

Ziel des Themenfeldes „Naturwissenschaften vermitteln“ ist es, den naturwissenschaftlichen Unterricht durch zeitgemäße Materialien und flankierende Lehrerfortbildungen zu stärken. Gemeinsam mit dem Netzwerk Teilchenwelt hat die Joachim Herz Stiftung in enger Abstimmung mit Lehrkräften, Didaktikern und Wissenschaftlern Unterrichtsmaterialien zum Thema Teilchenphysik entwickelt, um aktuelle und forschungsnahe Fragestellungen aus den Naturwissenschaften für die Schule aufzubereiten. Die entstandenen Materialien stehen unter **www.leifiphysik.de/tp** und **www.teilchenwelt.de** kostenfrei zum Download zur Verfügung.

Für weitere Informationen zum Unterrichtsmaterial Teilchenphysik und zu LEIFiphysik schreiben Sie uns:

leifi@joachim-herz-stiftung.de
Joachim Herz Stiftung
Programmbereich Naturwissenschaften
Langenhorner Chaussee 384
22419 Hamburg

Die gemeinnützige Joachim Herz Stiftung arbeitet überwiegend operativ und ist vorrangig in den Themenfeldern Naturwissenschaften, Wirtschaft sowie Persönlichkeitsbildung tätig. In diesen drei Bereichen werden auch kleine, innovative Projekte Dritter gefördert. Seit 2017 unterstützt die Stiftung zudem Forschungsprojekte in den Themenfeldern Medizin und Recht. Die Joachim Herz Stiftung wurde 2008 errichtet und gehört zu den großen deutschen Stiftungen. **www.joachim-herz-stiftung.de**

Der Programmbereich Naturwissenschaften führt Kinder und Jugendliche an die Naturwissenschaften heran und fördert den wissenschaftlichen Nachwuchs auf dem Weg in die Wissenschaftskarriere. Denn naturwissenschaftliche Allgemeinbildung und das Interesse an neuen Forschungsfragen sind Voraussetzungen für individuelle Urteilsfähigkeit und gesellschaftliche Weiterentwicklung.

Ziel des Themenfeldes „Naturwissenschaften vermitteln“ ist es, den naturwissenschaftlichen Unterricht durch zeitgemäße Materialien und flankierende Lehrerfortbildungen zu stärken. Gemeinsam mit dem Netzwerk Teilchenwelt hat die Joachim Herz Stiftung in enger Abstimmung mit Lehrkräften, Didaktikern und Wissenschaftlern Unterrichtsmaterialien zum Thema Teilchenphysik entwickelt, um aktuelle und forschungsnahe Fragestellungen aus den Naturwissenschaften für die Schule aufzubereiten. Die entstandenen Materialien stehen unter **www.leifiphysik.de/tp** und **www.teilchenwelt.de** kostenfrei zum Download zur Verfügung.